

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование физико-механических свойств прототипа конструкционного элемента для термоядерного реактора DEMO

УДК 621.039.6.002.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Головков Никита Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин А.Г.	к.т.н.		

Консультант ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник ЛБ НЦ АО «УМЗ»	Ударцев С.В.			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

Дорофеева

Л.И.

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM91	Головкову Никите Игоревичу

Тема работы:

Исследование физико-механических свойств прототипа конструкционного элемента для термоядерного реактора DEMO
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Утверждена приказом директора (дата, номер) 1-22/с от 01.04.2021 </div>

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> – Заготовка из бериллида хрома – Точность изготовления образцов не менее 1 мм; – Разрешение весов не менее 0,001 г.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> – Определение основных физико-механических свойств образцов бериллида хрома; – Сравнение полученных результатов с данными для хрома и бериллия; – Анализ полученных результатов и оценка применения материала в качестве конструкционного элемента.

Перечень графического материала	– презентация.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Тимченко С.Н.
Иностранный язык	Коротченко Т.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
Литературный анализ свойств бериллида хрома и технологического устройства термоядерных реакторов	
Методика проведения эксперимента и оборудование	
Проведение эксперимента	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин А.Г.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Головков Никита Игоревич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа		ФИО	
0AM91		Головкову Никите Игоревичу	
Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Стоимость расходных материалов; 2. Норматив заработной платы.
Нормы и нормативы расходования ресурсов	Коэффициенты для расчета заработной платы.
Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Потенциальные потребители результатов исследования; 2. Анализ конкурентных технических решений; 3. SWOT – анализ.
Разработка устава научно-технического проекта	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1. Структура работ в рамках научного исследования; 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3. Расчет бюджета научно - технического исследования (НТИ).
Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. Диаграмма Ганта
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Головков Никита Игоревич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ91	Головкову Никите Игоревичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Исследование физико-механических свойств прототипа конструкционного элемента для термоядерного реактора DEMO

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i>	Исследование физико-механических свойств бериллида хрома. Область применения: металлургия, ядерная энергетика..
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации; – СанПиН 1.2.3685-21; – СНиП 41-01-2003; – ТОИ Р-45-084-01; – ГОСТ 12.1.038-82; – Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
<i>2. Производственная безопасность:</i> <i>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов.</i> <i>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</i>	– Повышенный уровень электромагнитного излучения; – Работа с соединениями бериллия; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Превышение уровня шума; – Отклонение показателей микроклимата; – Поражение электрическим током.
<i>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</i>	– Наиболее вероятная аварийная ситуация на рабочем месте – пожар; – Также возможны: аварии с электрооборудованием и обнаружение предмета, похожего на взрывное устройство.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ91	Головков Никита Игоревич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
26.02.2021	Выдача задания	
24.03.2021	Получение исходного соединения бериллида хрома	
30.03.2021	Изготовление образцов	
03.05.2021	Определение физико-механических свойств	
18.05.2021	Определение коррозионной стойкости	
19.05.2021	Анализ результатов	
22.05.2021	Написание ВКР	
31.05.2021	Сдача работы	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин А.Г.	к.т.н.		

Консультант ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник ЛБ НЦ АО «УМЗ»	Ударцев С.В.			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 118 страниц, 20 рисунков, 26 таблиц, 51 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: бериллид хрома; бериллий; хром; интерметаллид; предел прочности; КТЛР; коррозионная стойкость.

Объектом исследования является бериллид хрома, рассматриваемый в качестве прототипа для использования в бланкете размножителя нейтронов термоядерного реактора ДЕМО.

Цель работы – исследование физико-механических свойств бериллида хрома.

В процессе исследования проводились испытания по определению физико-механических свойств, произведен расчет финансовой составляющей работы, определены факторы, влиявшие на выполнение работы.

В результате исследования определены плотность, микротвердость, КТЛР, показатели коррозии, пределы прочности на сжатие и изгиб, получены сведения о микроструктуры образцов.

Область применения: металлургия, ядерная энергетика.

Ввиду закрытости данных относительно характера применения результатов данной разработки, оценка её экономической эффективности объективно невозможна.

В процессе работы с консультантом по социальной ответственности выявлены опасные и вредные факторы, воздействующие на человека во время выполнения данного проекта.

Обозначения и сокращения

АЭС – атомная электрическая станция;

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;

КТЛР – коэффициент термического линейного расширения;

КРТ – коэффициент размножения трития;

МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций;

ПЭВМ – прикладная электронно-вычислительная машина;

РСА – рентгеноструктурный анализ;

СВЧ – сверхвысокие частоты;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭМП – электромагнитное поле.

Содержание

Введение.....	13
Актуальность	14
1. Бериллид хрома CrBe_{12}	15
1.1 Химические и физические свойства бериллия	15
1.2 Применение бериллия.....	16
1.3 Химические и физические свойства хрома	18
1.4 Интерметаллиды бериллия.....	19
1.5 Бериллид хрома	21
2. ИТЭР.....	22
2.1 Общая информация.....	22
2.2 Цели	24
2.3 Техническое исполнение	25
2.3.1 Вакуумная камера	25
2.3.2 Бланкет размножителя.....	26
2.3.3 Магнитная система.....	28
2.3.4 Дополнительный нагрев	28
2.3.5 Криостат	29
2.3.6 Дивертор.....	30
2.3.7 Охлаждающие системы	30
3. DEMO	31
3.1 Общая информация.....	31
3.2 Подход к проектированию	32
3.2.1 Обзор основных проблем интеграции технологий и конфигураций	32
3.3 Основные достижения	33
3.3.1 Бланкет размножителя.....	33
3.3.2 Дивертор.....	34
3.3.3 Заправка тритием и вакуум (WPTFV).....	34
4. Применение интерметаллидов бериллия в термоядерной энергетике	36

4.1 Концепт штифтаblankета размножителя охлаждаемого гелием (НСРВ)	36
4.2 Опыт получения бериллида титана на АО «УМЗ»	38
5. Практическая часть	41
5.1 Получение заготовки. Определение плотности и микротвердости	41
5.2 Микроструктура	43
5.3 Определение коэффициента термического линейного расширения (КТЛР)	44
5.3 Определение коррозионной стойкости	45
5.4 Определение предела прочности на сжатие и на изгиб	50
6 Социальная ответственность	53
6.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	54
6.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	55
6.2.1 Организационные мероприятия	55
6.2.2 Технические мероприятия	55
6.3 Условия безопасной работы	58
6.4 Электробезопасность	60
6.5 Пожарная и взрывная безопасность	61
6.6 Техника безопасности при работах с бериллием и его соединениями	63
6.6.1 Санитарно-гигиенические требования к технологическим процессам и оборудованию	64
6.6.2 Требования к вентиляции	65
6.6.3 Меры личной гигиены и средства индивидуальной защиты	66
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	68
7.1 Потенциальные потребители результатов исследования	69
7.2 Анализ конкурентных технических решений	70
7.3 SWOT-анализ	72
7.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	73
7.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	76

7.6 Инициация проекта	77
7.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта	79
7.8 Бюджет научного исследования	82
7.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	86
Заключение	90
Список публикаций.....	92
Список использованных источников	97
Приложение А	102

Введение

Вопрос энергообеспечения в современном мире является одним из самых важных и остро поставленных. Ввиду роста потребностей возникает необходимость поиска дополнительных видов энергетики. С развитием технологий появляются различные альтернативные источники энергетики, однако многие из них являются малоэффективными и нерентабельными.

На сегодняшний день основными источниками энергии являются уголь и газ, которые помимо того, что являются иссякаемыми источниками, наносят большой вред окружающей среде. Следствием использования угля и газа для обеспечения населения тепловой и электроэнергией является большое количество выбросов продуктов горения и различных вредных веществ в атмосферу, что негативно влияет на экологическую обстановку, особенно вблизи территорий, где находятся энерговырабатывающие предприятия.

Другой проблемой является то, что данные источники являются иссякаемыми и рано или поздно выработка энергии на их основе станет непомерно дорогостоящей и в конце концов прекратится.

Исходя из вышеуказанных причин развитие технологий, позволяющих производить энергию иными способами, является весьма актуальным. Одной из наиболее перспективных отраслей данной сферы является ядерная энергетика. На данный момент в мире функционируют 192 атомных электростанций (АЭС), на которых введены в эксплуатацию 438 энергоблоков. Принцип их работы основан на управляемой цепной ядерной реакции деления, при которой выделяется большое количество тепловой энергии.

Другим потенциальным источником энергии, работающем на основе ядерных реакций, являются термоядерные реакторы. Принцип их работы

закключается в выделении большого количества тепла при протекании ядерной реакции синтеза.

Актуальность

Интерес к управляемому термоядерному синтезу возник еще в 1950-х годах, однако на данный момент ученым удалось достичь удержания плазмы на протяжении всего 8 секунд.

На данный момент в стадии разработки находится термоядерный реактор ITER, планируемая дата запуска которого – 2025 г. Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерной реакции синтеза и решении физических и технологических проблем.

Другим крупным проектом является DEMO, на котором планируется непрерывная генерация энергии до 2 ГВт.

Оба проекта являются очень масштабными, и их соучредителями являются множество стран. Для их реализации требуется рассмотрение различных концепций, необходимых для выбора наиболее оптимальных конструкционных решений, которые позволят реакторам работать без перебоев.

Ввиду этого к разработке проектов подключено множество университетов и научных лабораторий, занимающихся изучением материалов для термоядерного реактора, конструкций и технологических узлов.

Одним из таких является блок blanketsа размножителя нейтронов. Ввиду распухания чистого бериллия при нейтронном облучении было принято решение использовать интерметаллиды бериллия. Так, на стадии изучения находятся бериллид титана TiBe_{12} и CrBe_{12} , являющиеся прототипами блока blanketsа размножителя, охлаждаемого гелием.

Помимо роли потенциального конструкционного элемента, бериллид хрома является перспективным соединением для отраслей металлургии и материаловедения, ввиду своих свойств, которые требуют более тщательного исследования.

1. Бериллид хрома CrBe_{12}

1.1 Химические и физические свойства бериллия

Бериллий (Be, лат. beryllium) — химический элемент второй группы, второго периода периодической системы с атомным номером 4. В чистом виде бериллий представляет собой твёрдый металл светло-серого цвета. Плотность бериллия составляет $1,848 \text{ г/см}^3$.

Бериллий — относительно твёрдый (5,5 баллов по Моосу), превосходящий по твердости другие лёгкие металлы (алюминий, магний), но хрупкий металл серебристо-белого цвета. Имеет высокий модуль упругости — 300 ГПа (у сталей — 200—210 ГПа). На воздухе активно покрывается стойкой оксидной плёнкой BeO. Скорость звука в бериллии очень высока — 12 600 м/с, что в 2—3 раза больше, чем в других металлах.

Для бериллия характерны две степени окисления — 0 и +2. Гидроксид бериллия (II) амфотерен, причём как основные (с образованием Be^{2+}), так и кислотные (с образованием $[\text{Be}(\text{OH})_4]_2^-$) свойства выражены слабо. Степень окисления +1 у бериллия была получена при исследовании процессов испарения бериллия в вакууме в тиглях из оксида бериллия BeO с образованием летучего оксида Be_2O в результате сопропорционирования $\text{BeO} + \text{Be} = \text{Be}_2\text{O}$. [1]

По многим химическим свойствам бериллий больше похож на алюминий, чем на находящийся непосредственно под ним в таблице Менделеева магний (проявление «диагонального сходства»).

Металлический бериллий относительно мало реакционноспособен при комнатной температуре. В компактном виде он не реагирует с водой и

водяным паром даже при температуре красного каления и не окисляется воздухом до 600 °С. Порошок бериллия при поджигании горит ярким пламенем, при этом образуются оксид и нитрид. Галогены реагируют с бериллием при температуре выше 600 °С, а халькогены требуют ещё более высокой температуры. Аммиак взаимодействует с бериллием при температуре выше 1200 °С с образованием нитрида Be_3N_2 , а углерод даёт карбид Be_2C при 1700 °С. С водородом бериллий непосредственно не реагирует [2].

Бериллий легко растворяется в разбавленных водных растворах кислот (соляной, серной, азотной), однако холодная концентрированная азотная кислота пассивирует металл. Реакция бериллия с водными растворами щелочей сопровождается выделением водорода и образованием гидроксобериллатов:



При проведении реакции с расплавом щелочи при 400—500 °С образуются бериллаты:



1.2 Применение бериллия

Бериллий вызывает дисперсионное твердение в меди, в виду чего сплавы меди и бериллия с содержанием бериллия до 2% по массе демонстрируют высокие физико-механические свойства: сопротивление износу, усталости. Данные свойства в совокупности со сравнительной простотой процесса получения данного типа сплава (восстановление бериллия углеродом в присутствии меди, растворение бериллия в меди) делают данное направление перспективным.

Бериллий в основном используют как легирующую добавку к различным сплавам. Добавка бериллия значительно повышает твёрдость и

прочность сплавов, коррозионную устойчивость поверхностей, изготовленных из этих сплавов изделий. В технике довольно широко распространены бериллиевые бронзы типа ВеВ (пружинные контакты). Добавка 0,5 % бериллия в сталь позволяет изготовить пружины, которые остаются упругими до температуры красного каления. Эти пружины способны выдерживать миллиарды циклов значительной по величине нагрузки. Кроме того, бериллиевая бронза не искрится при ударе о камень или металл. Один из сплавов носит собственное название рандоль. Благодаря его сходству с золотом рандоль называют «цыганским золотом».

В атомных реакторах из бериллия изготавливают отражатели нейтронов, его используют как замедлитель нейтронов. В смесях с некоторыми α -радиоактивными нуклидами бериллий используют в ампульных нейтронных источниках, так как при взаимодействии ядер бериллия-9 и α -частиц возникают нейтроны: ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow \text{n} + {}^{12}\text{C}$.

Оксид бериллия наряду с металлическим бериллием служит в атомной технике как более эффективный замедлитель и отражатель нейтронов, чем чистый бериллий. Кроме того, оксид бериллия в смеси с окисью урана применяется в качестве очень эффективного ядерного топлива. Фторид бериллия в сплаве с фторидом лития применяется в качестве теплоносителя и растворителя солей урана, плутония, тория в высокотемпературных жидкосолевых атомных реакторах [3].

Фторид бериллия используется в атомной технике для варки стекла, применяемого для регулирования небольших потоков нейтронов. Самый технологичный и качественный состав такого стекла – (BeF_2 — 60 %, PuF_4 — 4 %, AlF_3 — 10 %, MgF_2 — 10 %, CaF_2 — 16 %). Этот состав наглядно показывает один из примеров применения соединений плутония в качестве конструкционного материала (частичное).

1.3 Химические и физические свойства хрома

Хром — элемент 6-й группы 4-го периода периодической системы химических элементов с атомным номером 24. Обозначается символом Cr (лат. Chromium). Плотность хрома составляет $7,19 \text{ г/см}^3$.

В свободном виде — голубовато-белый металл с кубической объёмноцентрированной решёткой, $a = 0,28845 \text{ нм}$. Ниже температуры 38°C является антиферромагнетиком, выше переходит в парамагнитное состояние (точка Нееля).

Хром имеет твёрдость по шкале Мооса 8.5. Один из самых твёрдых чистых металлов. Очень чистый хром достаточно хорошо поддаётся механической обработке [4].

В соединениях обычно проявляет степени окисления +2, +3, +6, однако известны соединения, где хром имеет степени окисления +1, +4 и +5. Химически малоактивен. При обычных условиях устойчив к кислороду и воде, но соединяется с фтором. При температуре выше 600°C взаимодействует с водой, азотом, углеродом, серой. Со многими металлами даёт сплавы. Легко реагирует с разбавленными соляной и серной кислотами, концентрированная азотная кислота и царская водка пассивируют хром. Соединения двухвалентного хрома — восстановители, соединения шестивалентного хрома — сильные окислители. Многие соединения хрома яркой окраски.

Применение хрома основано на его жаропрочности, твёрдости и устойчивости к коррозии. Больше всего хром используют для выплавки хромистых (нержавеющих) сталей и сплавов (нихром и др.). Значительное количество хрома идёт на декоративные коррозионно-стойкие покрытия (хромирование). Порошковый хром используется при производстве материалов для сварочных электродов, огнеупоров, лазерных материалов [5].

1.4 Интерметаллиды бериллия

Высокая прочность бериллидов при высоких температурах, особенно бериллидов переходных металлов (рис. 1.1), в ~ 10 раз превышающая прочность керамик, в сочетании с высокой стойкостью против окисления, а также высокой теплопроводностью (которая в 2 раза выше, чем у высокотемпературных материалов на основе окислов) делают перспективным использование бериллидов в качестве материалов жаропрочных и других высокотемпературных сплавов с максимальной рабочей температурой до 1700° . Сообщается о промышленном применении бериллидовых жаропрочных материалов [6].

Так, детали конструкций космических и управляемых снарядов, изготовленные из таких материалов, способны выдерживать в 1,5 раза более высокие температуры по сравнению с обычно допустимыми для сплавов на основе кобальта, никеля и ниобия. Сочетание высокой удельной прочности с малым удельным весом (2,7 до 5—6) делает особенно перспективным использование бериллидов в авиации и ракетной технике. Важнее для этих областей использования — сопротивление бериллидов тепловым ударам при малых скоростях теплопередачи и высоких температурах, которое выше, чем у большинства металлических окислов, но ниже, чем у графита, плавленной двуокиси кремния и керметов на основе TiC; при больших скоростях теплопередачи бериллиды обладают таким же сопротивлением тепловому удару, как и ThO_2 , ZrO_2 и Al_2O_3 .

Бериллиды представляют значительный практический интерес для ядерной физики и энергетики. Так, бериллид UBe_{13} в жидких щелочных металлах представляет интерес в качестве ядерного горючего в тепло-выделяющих элементах дисперсного типа [7]. Сообщается также о дисперсионных системах $\text{Be} - \text{UBe}_{13}$. Обсуждается использование в качестве замедлителей NbBe_{12} , YBe_{13} и ZrBe_{12} [8]. Находит применение в

качестве нейтронного источника бериллид PuBe_{13} , дающий стабильный выход нейтронов благодаря длительному периоду полураспада плутония.

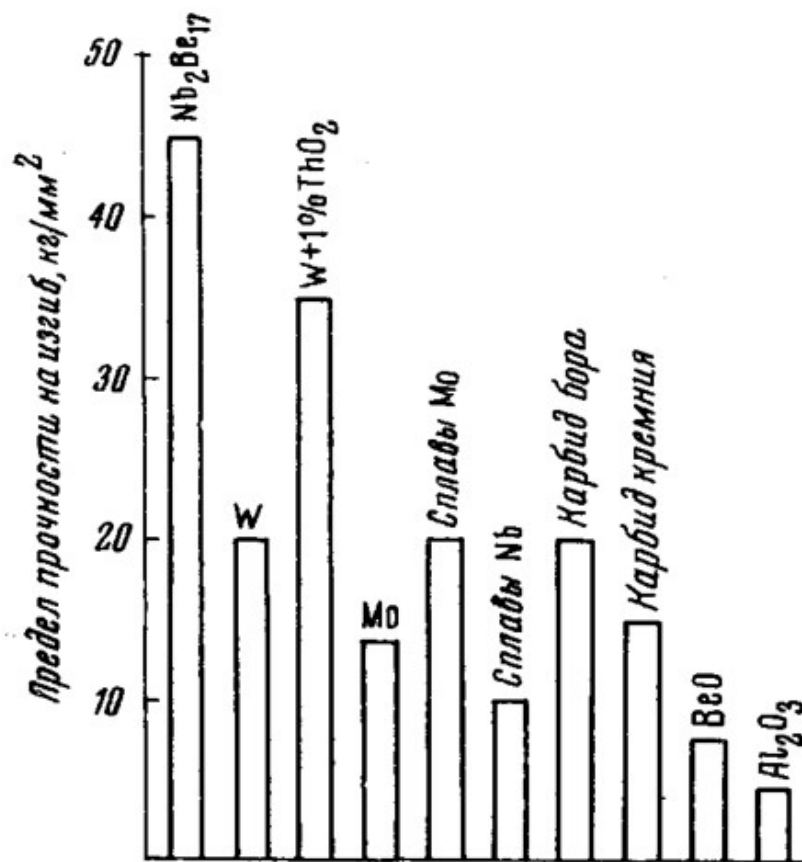


Рисунок 1.1 – Сравнительная прочность бериллидов и других тугоплавких металлов (при 1370 °C)

Особенность электронного строения атома бериллия, заключающаяся в возможности образования им как металлической связи, осуществляемой валентными s-электронами, так и ковалентных связей, осуществляемых sp-электронными конфигурациями, обуславливает как дуализм свойств собственно бериллия, являющегося одновременно металлом и неметаллом, или полуметаллом, так и многообразие соединения бериллия с другими металлами — бериллидов и их физико-химических свойств. В свою очередь, многообразие свойств обеспечивает широкие потенциальные возможности применения этого важного и сложного класса химических соединений, особенно в различных отраслях техники высоких температур, ядерной

физике, технике полупроводников, в катализе. Исследование природы химической связи в бериллидах имеет существенное значение для развития принципов современной металлохимии и создания новых неорганических материалов с заранее заданными физико-техническими характеристиками.

1.5 Бериллид хрома

Диаграмма системы Cr — Be (рис. 1.2) построена Эдвардсом и Джонстоном [101] до содержания 30 вес. % Be и показывает наличие бериллида состава CrBe_2 , который уже ранее был установлен и рентгенографически идентифицирован [9, 10].

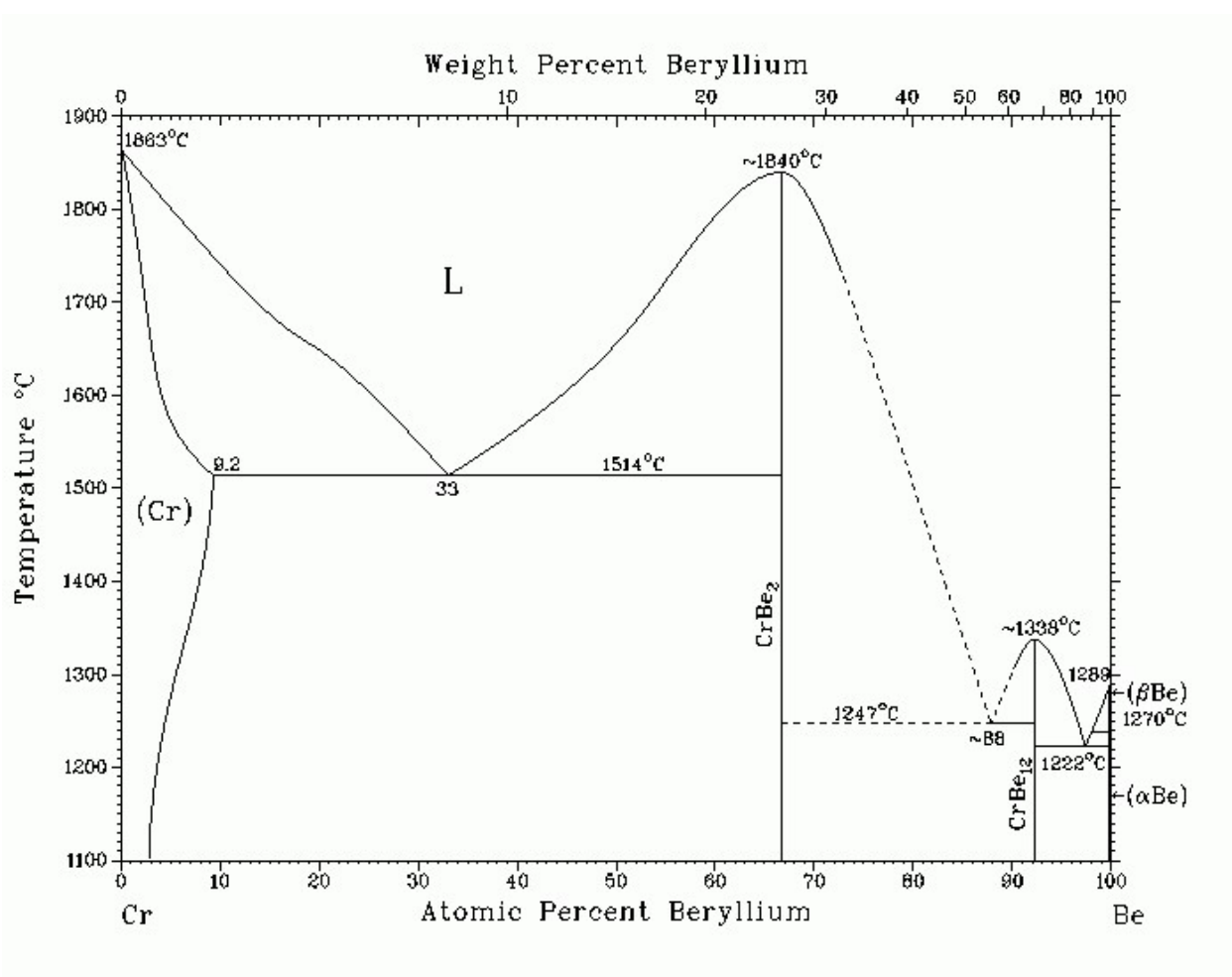


Рисунок 1.2 – Диаграмма состояния хром - бериллий

CrBe_2 — фаза переменного состава, гомогенная, по данным [11], в области, по крайней мере, от 70,9 до 77,5 ат.% Be. В работах [11-13] было установлено второе соединение— CrBe_{12} , существующее в узкой области концентраций при содержании бериллия, близком к 92 ат.% [12]. Это соединение на диаграмме рис. 1.2 обозначено символом X. Данные о

свойствах бериллидов хрома приведены в табл. 1.1. Получение бериллидов хрома производили сплавлением компонентов в среде чистого аргона, они могут успешно получаться также методами порошковой металлургии [12, 14, 15].

Таблица 1.1 – Свойства бериллида хрома

Параметр	Значение
Содержание Be, вес. %	68,1
Структура	Тетрагональная
Структурный тип	ThMn ₁₂
Параметры решетки, Å	
a	7,234
c	4,176
c/a	0,577
Плотность, г/см ³	2,437

2. ИТЭР

2.1 Общая информация

ИТЭР - это международный мегапроект в области исследований и инженерии ядерного синтеза, который станет крупнейшим в мире экспериментом по физике плазмы с магнитным удержанием. Это попытка воспроизвести процессы синтеза Солнца для создания энергии на Земле с помощью экспериментального термоядерного реактора токамак, который строится рядом с заводом в Кадараше на юге Франции [16, 17] Основная цель ИТЭР - продемонстрировать научную и техническую осуществимость безопасной, чистой и неограниченной термоядерной энергии для мирного использования [16]. ИТЭР также будет испытывать новые технологии, такие как воспроизводство трития в условиях реального термоядерного синтеза, и его результаты предназначены для поддержки мировой индустрии ядерного синтеза [18]. Название «ИТЭР» расшифровывается как «Международный термоядерный экспериментальный реактор», но в проекте также используется латинское определение слова «iter», что означает «путь» или «дорога» [19].

Термоядерный термоядерный реактор ИТЭР был разработан для использования 50 мегаватт тепловой мощности для создания плазмы мощностью 500 мегаватт (тепловой) в течение периодов от 400 до 600 секунд [20]. Это означало бы десятикратное увеличение мощности нагрева плазмы или, если измерять тепловую мощность на входе и выходе, $Q \geq 10$ [21]. Текущий рекорд по производству энергии с использованием ядерного синтеза установлен на реакторе Joint European Torus в Калхэме, Великобритания, который выдал 24 мегаватта тепловой энергии для создания 16-мегаваттной плазмы с добротностью 0,67 [22]. Таким образом, установка ИТЭР призвана продемонстрировать, впервые в термоядерном реакторе, принцип производства большей тепловой мощности, чем используется для нагрева плазмы. Однако, помимо нагрева плазмы, общее количество электроэнергии, потребляемой реактором и установками, будет варьироваться от 110 МВт до 620 МВт пикового значения в течение 30-секундных периодов во время работы в плазме [23]. Более того, поскольку реактор является исследовательским, преобразование тепла в электрическое не предполагается, и ИТЭР не будет производить достаточную мощность для чистого производства электроэнергии. Вместо того, чтобы генерировать электричество, тепло, выделяемое плазмой, будет отводиться [24].

Проект ИТЭР финансируется и управляется семью участниками: Европейским союзом, Китаем, Индией, Японией, Россией, Южной Кореей и США, а также Соединенным Королевством и Швейцарией, участвующими через Евратом. В общей сложности проект ИТЭР охватывает 35 стран, которые представляют половину населения мира и 85% мирового ВВП. ИТЭР также имеет соглашения о сотрудничестве с Австралией, Казахстаном и Канадой [25]. Строительство комплекса ИТЭР началось в 2013 году, а сборка токамака началась в 2020 году [26]. Первоначальный бюджет ИТЭР был близок к 6 миллиардам евро, но теперь ожидается, что общая стоимость строительства и эксплуатации ИТЭР составит от 18 до 22 миллиардов евро [27]. Однако по другим оценкам общая стоимость составляет от 45 до 65

миллиардов долларов, что оспаривается ИТЭР [28]. Каким бы ни был окончательный бюджет, ИТЭР уже был описан как самый дорогостоящий научный эксперимент всех времен, самый сложный инженерный проект в истории человечества, и одно из самых амбициозных человеческих совместных проектов с момента освоения международного космоса. Станция (бюджет 100 миллиардов евро) и Большой адронный коллайдер (бюджет 7,5 миллиардов евро) [29].

2.2 Цели

Заявленная миссия ИТЭР - продемонстрировать возможность использования термоядерной энергии в качестве крупномасштабного безуглеродного источника энергии. В частности, цели проекта:

- - Мгновенно создавать термоядерную плазму с тепловой мощностью, в десять раз превышающей введенную тепловую мощность (значение Q , равное 10).
- - Получение стабильной плазмы со значением Q больше 5. ($Q = 1$ - научная безубыточность).
- - Поддержание термоядерного синтеза до 8 минут.
- - Разработка технологий и процессов, необходимых для термоядерной электростанции, включая сверхпроводящие магниты и дистанционное управление (обслуживание с помощью роботов).
- - Проверить концепции воспроизводства трития.
- - Усовершенствовать нейтронную защиту / технологию преобразования тепла (большая часть энергии в реакции синтеза $D + T$ выделяется в виде быстрых нейтронов.).

Цели проекта ИТЭР не ограничиваются созданием устройства ядерного синтеза, а гораздо шире, включая создание необходимых технических, организационных и логистических возможностей, навыков, инструментов, позволяющих управлять такими мегапроектами.

2.3 Техническое исполнение

2.3.1 Вакуумная камера

Вакуумная камера (рис. 1.3) представляет собой центральную часть устройства машины ИТЭР: стальной контейнер с двойными стенками, в котором плазма удерживается с помощью магнитных полей.

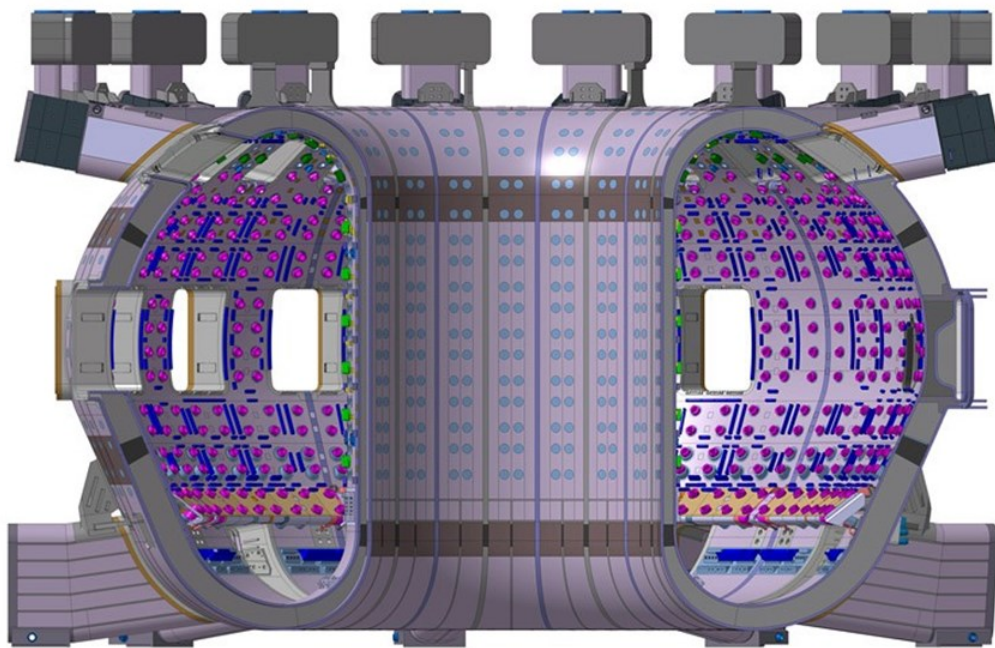


Рисунок 1.3 – Устройство вакуумной камеры

Вакуумная камера ИТЭР будет в два раза больше и в 16 раз тяжелее любого ранее изготовленного термоядерного корпуса: каждый из девяти торообразных секторов будет весить примерно 500 тонн при общем весе 5000 тонн. С учетом всех защитных и портовых конструкций это в сумме составляет 5 116 тонн. Ее внешний диаметр составит 19,4 метра (64 фута), а внутренний 6,5 метра (21 фут). После сборки вся конструкция будет иметь высоту 11,3 метра (37 футов). [30]

Основная функция вакуумной камеры - создание герметичного контейнера для плазмы. Его основные компоненты - это основная камера, коммуникационные устройства и вспомогательная система. Основная камера

представляет собой двустенную конструкцию с полоидальными и тороидальными ребрами жесткости между оболочками толщиной 60 миллиметров (2,4 дюйма) для усиления конструкции сосуда. Эти ребра также образуют проходы для охлаждающей воды. Пространство между двойными стенами заполняют щитовые конструкции из нержавеющей стали. Внутренние поверхности камеры будут действовать как интерфейс с модулем размножителя, содержащими бланкет размножителя. Эти модули будут обеспечивать защиту от нейтронов высокой энергии, образующихся в реакциях синтеза, а некоторые из них также будут использоваться для концепций воспроизводства трития

Вакуумная камера имеет в общей сложности 44 отверстия, которые называются портами - 18 верхних, 17 экваториальных и 9 нижних портов, которые будут использоваться для операций дистанционного управления, диагностических систем, инъекции нейтрального луча и вакуумной откачки. Дистанционное управление необходимо из-за радиоактивности внутренней части реактора после остановки, вызванной нейтронной бомбардировкой во время работы.

Вакуумная откачка будет проводиться до начала реакций синтеза, чтобы удалить все молекулы и создать необходимую низкую плотность, которая примерно в миллион раз ниже плотности воздуха [31].

2.3.2 Бланкет размножителя

В ИТЭР будет использоваться дейтерий-тритиевое топливо, и хотя дейтерия в природе много, тритий встречается гораздо реже, потому что это изотоп водорода с периодом полураспада всего 12,3 года, а природного трития на Земле всего около 3,5 кг. Из-за этого ограниченного земного содержания трития ключевым компонентом конструкции реактора ИТЭР является бланкет-размножитель (рис. 1.4). Этот компонент, расположенный рядом с вакуумной камерой, служит для производства трития в результате

реакции с нейтронами из плазмы. Есть несколько реакций, которые производят тритий внутри blankets. Литий-6 производит тритий посредством (n, t) реакций с замедленными нейтронами, в то время как литий-7 производит тритий посредством взаимодействия с нейтронами более высоких энергий через (n, nt) реакции [32].



Рисунок 1.4 – Устройство blankets размножителя

Концепции создания blankets для размножителей включают методы литиево-свинцового охлаждения с гелием (HCLL), гелиевого слоя с гелиевым охлаждением (HCPV) и литиево-свинцовые методы с водяным охлаждением (WCLL). Требования к материалам для размножения включают хорошее производство и извлечение трития, механическую стабильность и низкий уровень радиоактивной активации.

2.3.3 Магнитная система

ИТЭР основан на термоядерном синтезе с магнитным удержанием, который использует магнитные поля для удержания термоядерного топлива в плазменной форме. Магнитная система, используемая в токамаке ИТЭР, будет самой большой сверхпроводящей магнитной системой из когда-либо построенных. В системе будут использоваться четыре типа магнитов для удержания плазмы: центральный соленоидный магнит, полоидальные магниты, катушки тороидального поля и корректирующие катушки. Центральная катушка соленоида будет иметь высоту 18 метров, ширину 4,3 метра и вес 1000 тонн. В ней будет использоваться сверхпроводящий сплав ниобий-олово, чтобы выдерживать ток 45 кА и создавать пиковое поле более 13 тесла.

18 катушек тороидального поля также будут использовать ниобий-олово. Это самые мощные сверхпроводящие магниты, когда-либо разработанные, с номинальной пиковой напряженностью поля 11,8 тесла и накопленной магнитной энергией 41 гигаджоуль. В других магнитах ИТЭР с более низким полем (полоидальное поле и катушки коррекции) в качестве сверхпроводящих элементов будет использоваться ниобий-титан [33].

2.3.4 Дополнительный нагрев

Чтобы достичь термоядерного синтеза, частицы плазмы должны быть нагреты до температур, достигающих 150 миллионов °C, и для достижения этих экстремальных температур необходимо использовать несколько методов нагрева. Внутри самого токамака изменяющиеся магнитные поля вызывают эффект нагрева, но также требуется внешний нагрев. В ИТЭР будет три типа внешнего нагрева:

- Два инжектора нагрева нейтрального пучка (HNB) на один миллион вольт, каждый из которых будет обеспечивать около 16,5 МВт

горящей плазмы, с возможностью добавления третьего инжектора. Лучи генерируют электрически заряженные ионы дейтерия, которые ускоряются через пять решеток для достижения необходимой энергии в 1 МВ, и лучи могут работать в течение всей длительности плазменного импульса, в общей сложности до 3600 секунд. Прототип строится на испытательном стенде нейтрального луча (NBTF), который был построен в Падуе, Италия. Также имеется нейтральный луч меньшего размера, который будет использоваться для диагностики, чтобы помочь обнаружить количество гелиевой золы внутри токамака.

- Система ионно-циклотронного резонансного нагрева (ICRH), которая вводит в плазму 20 МВт электромагнитной энергии с помощью антенн для генерации радиоволн, которые имеют ту же скорость колебаний, что и ионы в плазме.

- Система электронного циклотронного резонансного нагрева (ECRH), которая нагревает электроны в плазме с помощью высокоинтенсивного пучка электромагнитного излучения.

2.3.5 Криостат

Криостат ИТЭР представляет собой большую конструкцию из нержавеющей стали массой 3850 тонн, окружающую вакуумный резервуар и сверхпроводящие магниты, с целью создания сверххолодной вакуумной среды. Его толщина (от 50 до 250 миллиметров (от 2,0 до 9,8 дюйма)) позволит ему выдерживать нагрузки, вызванные атмосферным давлением, действующим на замкнутый объем в 8 500 кубических метров. 9 июня 2020 года компания Larsen & Toubro завершила поставку и установку модуля криостата. Криостат - главный компонент комплекса токамаков, который расположен на сейсмически изолированном основании [34].

2.3.6 Дивертор

Дивертор - это устройство внутри токамака, которое позволяет удалять отходы и примеси из плазмы во время работы реактора. В ИТЭР дивертор будет извлекать тепло и золу, которые образуются в процессе термоядерного синтеза, а также защищать окружающие стены и уменьшать загрязнение плазмой.

Дивертор ИТЭР, который сравнивают с массивной пепельницей, состоит из 54 частей из нержавеющей стали, известных как кассеты. Каждая кассета весит около восьми тонн и имеет размеры 0,8 x 2,3 x 3,5 метра. Проектирование и строительство дивертора контролируется агентством Fusion For Energy.

Когда токамак ИТЭР находится в эксплуатации, обращенные к плазме блоки выдерживают всплески тепла до 20 мегаватт на квадратный метр, что более чем в четыре раза выше, чем у космического корабля, входящего в атмосферу Земли.

Испытания дивертора проводятся на испытательном стенде дивертора ИТЭР (IDTF) в России. Этот объект был создан в Институте Ефремова в Санкт-Петербурге в рамках Соглашения о закупках ИТЭР, в рамках которого проектирование и производство распределяются по странам-участницам проекта [35].

2.3.7 Охлаждающие системы

Токамак ИТЭР будет использовать взаимосвязанные системы охлаждения для управления теплом, выделяемым во время работы. Большая часть тепла будет отводиться первичным водяным контуром охлаждения, который сам охлаждается водой через теплообменник внутри вторичного ограждения здания токамака. Вторичный охлаждающий контур будет охлаждаться более крупным комплексом, включающим градирню, трубопровод длиной 5 км (3,1 мили), подающий воду из канала де Прованс, и

бассейны, которые позволяют охлаждать охлаждающую воду и проверять ее на химическое загрязнение и тритий перед выпуском в реку Дюранс. Эта система должна будет рассеивать в среднем 450 МВт во время работы токамака. Система с жидким азотом обеспечит дополнительно 1300 кВт охлаждения до 80 К ($-193,2^{\circ}\text{C}$; $-315,7^{\circ}\text{F}$), а система с жидким гелием обеспечит охлаждение 75 кВт до 4,5 К ($-268,65^{\circ}\text{C}$; $-451,57^{\circ}\text{F}$). Система с жидким гелием будет спроектирована, изготовлена, установлена и введена в эксплуатацию компанией Air Liquide во Франции [36].

3. DEMO

3.1 Общая информация

DEMO (DEMOstration Power Plant) - это предлагаемая термоядерная электростанция, созданная на базе экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Обычно считается, что цели DEMO лежат где-то между целями ИТЭР и коммерческой электростанции «первого в своем роде First of a kind» (FOAK), иногда называемой PROTO.

Хотя нет четкого международного консенсуса относительно точных параметров или объема, следующие параметры использовались в качестве базовых для проектных исследований: DEMO должен производить не менее 2000 мегаватт (2 гигаватт) термоядерной энергии на постоянной основе, и он должен производить 25 раз больше мощности, чем требуется для безубыточности. Проект DEMO мощностью от 2 до 4 ГВт будет в масштабе современной электростанции.

Для достижения своих целей при использовании обычной конструкции токамака DEMO должен иметь линейные размеры примерно на 15% больше, чем ИТЭР, и плотность плазмы примерно на 30% больше, чем ИТЭР. В качестве прототипа коммерческого термоядерного реактора в 2006 году было подсчитано, что DEMO сможет сделать термоядерную энергию

доступной к 2033 году, но сейчас проектирование запланировано на 2020-е годы, а предлагаемые операции теперь отложены до 2050-х годов. По оценкам, последующие коммерческие термоядерные реакторы могут быть построены примерно за четверть стоимости DEMO. Однако опыт ИТЭР показывает, что разработка многомиллиардного цикла технологических инноваций на основе токамаков, способного разработать термоядерные электростанции, которые могут конкурировать с технологиями, не связанными с термоядерным синтезом, вероятно, столкнется с проблемой «долины смерти» в венчурном капитале, т. е. недостаточные инвестиции, чтобы выйти за рамки прототипов, поскольку токамаки DEMO должны будут разрабатывать новые цепочки поставок и являются трудоемкими [37].

3.2 Подход к проектированию

3.2.1 Обзор основных проблем интеграции технологий и конфигураций

ИТЭР является ключевым объектом стратегии ЕС, и ожидается, что при проектировании и НИОКР DEMO будет в значительной степени использоваться опыт, накопленный при проектировании, строительстве и эксплуатации ИТЭР. Однако есть несколько различий между ИТЭР и DEMO, и есть ряд технологических, физических и лицензионных вопросов, которые еще предстоит решить, помимо ИТЭР, DEMO. Из-за сквозного характера этих проблем они влияют на одну или несколько ключевых ядерных систем или имеют важные взаимосвязи с ними. Таким образом, поскольку они оказывают сильное влияние на ядерную конфигурацию, безопасность, ремонтпригодность и лицензирование, они должны быть изучены и решены на этапе предконцептуального проектирования. Они представляют собой проблемы проектирования, которые не могут быть решены изолированно, но требуют исследования рассматриваемых вариантов в контексте более широкой архитектуры предприятия и связанных граничных ограничений.

Полное их исследование и управление множеством связанных конфигураций представляет собой одну из основных задач и усилий на этапе предконцептуального проектирования [38].

3.3 Основные достижения

3.3.1 Бланкет размножителя

В настоящее время четыре варианта конструкции с разным уровнем конструктивной и технологической готовности все еще рассматриваются как потенциальные бланкеты для драйверов в WPBV, использующие гелий, воду и LiPb в качестве хладагентов и твердое тело или LiPb в качестве размножителя трития / умножителя нейтронов [30,39]. Стратегия состоит в том, чтобы прийти к выбору блока бланкета DEMO примерно к 2024 году, принимая во внимание проектные и НИОКР, полученные не только в области бланкета, но и безопасности, материалов, баланса установки, удаленного обслуживания и т.д. Это позволит совместно разработать концепцию установки DEMO для анализа проекта к 2027 году. Для обоих случаев с гелием и водой в качестве хладагента изучаются предварительные проектные схемы и анализ производительности и систем преобразования энергии с учетом реалистичной компоновки трубопроводов теплоносителя и требуемый массовый расход. Это позволяет оценить запас теплоносителя и связанную с ним энтальпию, которые вместе с разделением системы и компоновкой являются важными данными для дальнейшего анализа безопасности и для проектирования ключевых систем, таких как система ограничения давления в вакуумном резервуаре, которая является важным классом безопасности. составная часть. Обновленная информация о прогрессе в дизайне и НИОКР представлена в работе [39].

3.3.2 Дивертор

В настоящее время разрабатываются семь различных концепций конструкции диверторных мишеней с водяным охлаждением и одна с гелиевым охлаждением. Помимо традиционной модели вольфрамового моноблока, подобной ИТЭР, были разработаны передовые концепции дизайна с использованием новых композитных материалов или нетрадиционных конструктивных решений. Ряд небольших макетов были успешно изготовлены с помощью специальных методов соединения и проверены специальными методами неразрушающего контроля, такими как ультразвуковой контроль и инфракрасная термография. Макеты проходят испытания для оценки характеристик теплового потока с использованием как холодной, так и горячей (130°C) охлаждающей воды. Макеты пяти целевых концепций выдержали не менее 100 циклов нагрузки при 20 МВт/м^2 , в то время как макеты остальных концепций все еще находятся в производстве или тестировании. Были спроектированы и оптимизированы трубопроводы контура охлаждения и внутренняя ребренная конструкция корпуса кассеты. 3D Анализ (вычислительная гидродинамика) подтвердил, что схема охлаждения обеспечивает требуемую мощность выхлопа с разумными теплогидравлическими характеристиками и приемлемым диапазоном рабочих температур для конструкционных материалов. Прогресс в текущих физических исследованиях, включая исследования инновационных диверторов, описан в работе [39].

3.3.3 Заправка тритием и вакуум (WPTFV)

Конструкция DEMO Tritium Systems разработана с учетом следующих руководящих принципов:

- Полное применение концепции прямой внутренней рециркуляции, приводящей к двум непрерывным контурам рециркуляции в дополнение к внешнему контуру с классическим разделением изотопов и тритиевой установкой. выхлопные детритиционные технологии;

- Минимизация запасов трития, требующая постоянной рециркуляции газов без хранения, предотвращение задержек трития на каждой стадии процесса и немедленное использование трития, высвобождаемого из бланкетов размножителя трития (без промежуточного хранения). Для увеличения доли выгорания рассматривается вопрос о дополнительном контуре обратной закачки выхлопных газов.

- Защита окружающей среды и минимизация доз при нормальных условиях эксплуатации и аварийных условиях.

Что касается разработки концепции и моделирования вакуумных систем DEMO, основные мероприятия включают:

- Ввод в эксплуатацию механической насосной линии в системе активной обработки газа JET, которая будет готова к работе на начальном этапе тритиевой кампании DT 2018–2020 гг. Этот насосный агрегат преподнесет ценный урок по сочетанию насоса пародиффузионного типа с жидкостным кольцевым насосом, оба работают с общим ртутным контуром.

- Разработка первого полностью укомплектованного модуля насоса из металлической фольги; после обширных испытаний характеристик металлической фольги. В области впрыска вещества усилия концентрируются на двух возможных концепциях впрыска гранул со стороны сильного магнитного поля, чтобы получить максимальную выгоду от эффектов дрейфа, либо с использованием системы изогнутых направляющих трубок с центрифугой, либо с возможностью свободного полета сверху, требующие менее развитой в настоящее время технологии двухступенчатого газового пистолета [40].

4. Применение интерметаллидов бериллия в термоядерной энергетике

4.1 Концепт штифта blankets размножителя охлаждаемого гелием (HCPV)

Штифты размножителя топлива состоят из внутренней и внешней оболочки, образованной двумя концентрическими трубками $\varnothing 16$ и $\varnothing 60$ мм с толщиной стенок 6 и 2 мм, соответственно. Объем, создаваемый оболочкой, заполняется усовершенствованным слоем гальки из керамического размножителя, который представляет собой смесь Li_4SiO_4 и Li_2TiO_3 . Объем закрыт фильтрующей пластиной, что позволяет продувочному газу ($\text{He} + 0,1$ мас.% H_2 в качестве эталона) протекать внутри штифтов. Большая толщина внутренней оболочки используется для обработки продольных канавок глубиной 4 мм и шириной 5 мм, закрытых пластиной толщиной ~ 1 мм. Полученные в результате каналы размером 3×5 мм во внутренней обшивке используются как обратные пути продувочного газа к коллекторам продувочного газа. Объем, окружающий напорные трубки, заполнен нейтронным множителем, которым является Be_{12}Ti в качестве эталона и расплавленный Pb в качестве резервного раствора. Поскольку содержание Be на единицу объема ниже в бериллидах по сравнению с чистым Be , ожидается, что коэффициент воспроизводства трития (TBR) для Be_{12}Ti ниже, чем для чистого Be , если принять во внимание ту же толщину множителя (рис. 4.1).

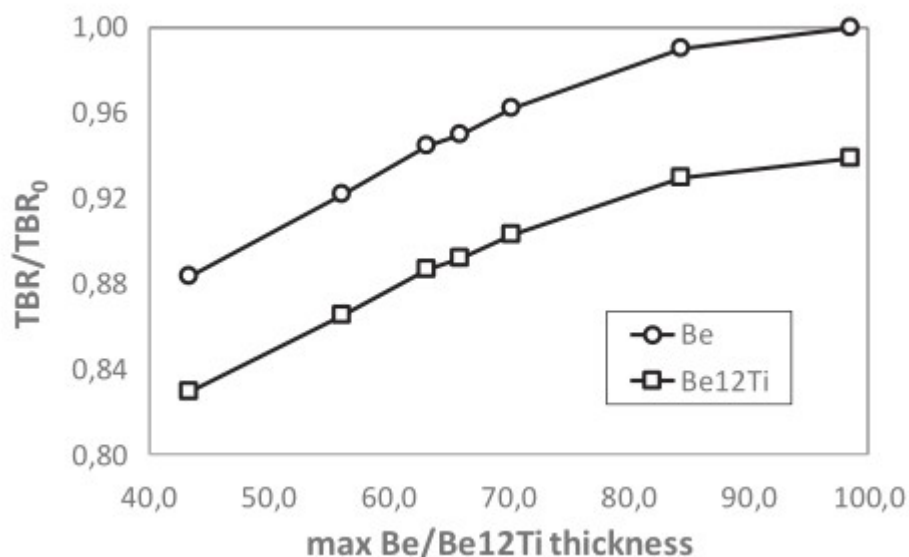


Рисунок 4.1 – Параметрический анализ коэффициента размножения трития (КРТ) в зависимости от профиля стержня для НСРВ на основе стержня-размножителя топлива с Be и Be₁₂Ti в качестве нейтронного умножителя.

На рис. 4.1 показан график нормализованной КРТ (KPT/KPT_0) в зависимости от максимальной толщины Be/Be₁₂Ti между штырями топливозовоодающего устройства, определяя KPT_0 как КРТ Be с толщиной 50 мм. Эта толщина была выбрана в качестве эталона для нормализации, так как она является максимально достижимой для Be до достижения расчетного температурного предела для этого материала [$\sim 650^\circ\text{C}$] в экваториальной области ОВ, что в основном обусловлено чрезмерное набухание в Be при более высоких температурах. При той же толщине КРТ для Be₁₂Ti падает примерно на 7% по отношению к Be. Однако КРТ с бериллидами можно компенсировать увеличением толщины множителя, как показано на рис. 4, поскольку Be₁₂Ti испытывает гораздо меньшее набухание, чем Be, и, следовательно, не имеет температурных ограничений, подобных Be. Фактически, действие бериллидов может быть увеличено до $\sim 1000^\circ\text{C}$ и фактически выше, при этом основным ограничением, вероятно, является скорость окисления при таких температурах. Наличие Be в форме галечного

сложившаяся в качестве размножающей керамики долгое время считалось возможным решением острой проблемы набухания Be при использовании в форме блоков, особенно если они должны быть припаяны к окружающим охлаждающим конструкциям. Однако очень низкое набухание бериллидов означает, что галька может не потребоваться. Кроме того, значительно увеличенное выделение трития в бериллидах поддерживает идею использования бериллидов в виде плит или блоков [41].

4.2 Опыт получения бериллида титана на АО «УМЗ»

Использование соединений Be или Be в форме призматических блоков аналогично использованию в индустрии деления, поскольку такая конфигурация может быть найдена в различных испытательных реакторах по всему миру. В частности, в Многопетлевом реакторе (МИР) (Российская Федерация) в качестве замедлителей используются гексагональные призматические блоки из Be, в которые вставляются тепловыделяющие элементы, конфигурация которых аналогична той, которая может быть предложена для конструкции штифта размножителя топлива. Хотя не было реактора деления, использующего Be_{12}Ti в качестве замедлителя, в некоторых отраслях промышленности есть опыт производства такого материала. В частности, Ульбинский металлургический завод (УМЗ) (Казахстан) произвел слитки Be_{12}Ti в рамках проекта с Японским агентством по атомной энергии, Mitsubishi Heavy Industries и NGK в качестве предыдущего этапа производства гальки с использованием РЗМ [42].

На АО «УМЗ» проводились испытания с использованием методов порошковой металлургии, которые на начальном этапе позволили получить компактную заготовку ($\varnothing 50 \times 50$ мм) из бериллида титана без дефектов (рис.4.2). Плотность полученной заготовки составила $2,237 \text{ г/см}^3$, что составляет 97,8 % от теоретического значения – $2,288 \text{ г/см}^3$.



Рисунок 4.2 – Заготовка из бериллида титана Be_{12}Ti , полученная методом порошковой металлургии

Из полученной заготовки на электроэрозионном станке было вырезано изделие (рис.4.3 а). Вырезка осуществлялась в два этапа: сперва в полученной заготовке формировалось сквозное отверстие в центральной части вдоль оси с помощью станка гидроабразивной резки, и далее применялся электроэрозионный станок для дальнейшего изготовления. Данный способ применялся в виду особенностей материала: высокая твердость и хрупкость, приводящая к откалыванию частиц при стандартных способах механической обработки.

Для данного изделия проводились испытания по термоциклированию. Для изделия проводился многократный нагрев и охлаждение от 300 до 1000°C за время примерно 60 секунд с целью определения устойчивости полученного материала к знакопеременным динамическим тепловым нагрузкам (рис. 4.3 б), что обусловлено режимами эксплуатации данного материала как элемента blankets-размножителя в термоядерном реакторе DEMO [43].

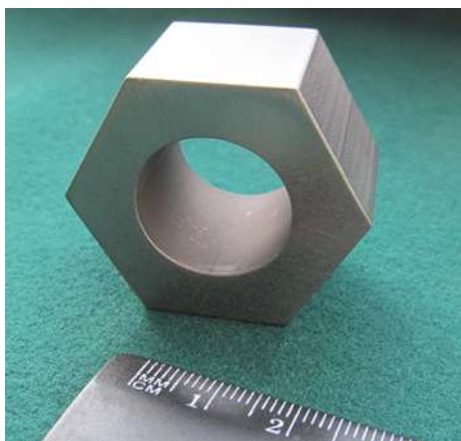


Рисунок 4.3 (а) – Изделие из бериллида титана Be_{12}Ti



Рисунок 4.3 (б) – Термоцилирование изделия из бериллида титана Be_{12}Ti

6 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности [45].

6.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.03.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Отделение ЯТЦ НИ ТПУ	Воздействие ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее	—	СанПиН 1.2.3685-21
	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	—	Пожарная безопасность	Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки) [46].

6.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

6.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу [47].

6.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

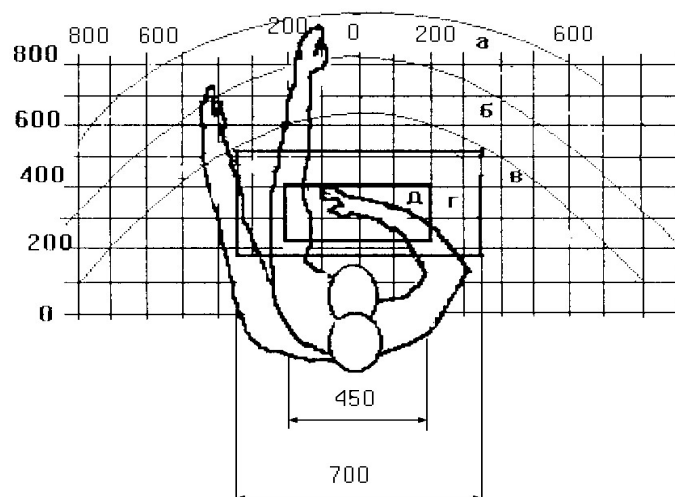


Рисунок 6.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони;
г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация: в зоне в (слева), легкой досягаемости ладони находится литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 - 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для

ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 - 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз студента на расстоянии 500 - 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической

напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека [48].

6.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03. приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температ ура, °С	Относител ьная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23 - 25	40 - 60	0,1
Теплый	23 - 25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20 - 25°C, зимой – 13-15 °C. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

При работе с компьютером использовался монитор, дисплей модуль, которого изготовлен из жидкокристаллической матрицы.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

6.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, токоведущих частей).

6.5 Пожарная и взрывная безопасность

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

- Возможные причины загорания:
- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т.д., необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.
- При возникновении аварийной ситуации необходимо:
- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией [48, 49].

6.6 Техника безопасности при работах с бериллием и его соединениями

Среди нерастворимых соединений бериллия наиболее токсичной является окись бериллия в виде высокодисперсной пыли. Степень токсичности нерастворимых соединений бериллия находится в прямой зависимости от дисперсности выделяющейся пыли. С повышением дисперсности пыли токсичность ее возрастает.

К менее токсичным соединениям могут быть отнесены углекислый бериллий, карбид бериллия, гидроокись бериллия. Основным путем проникновения бериллия и его соединений в организм является поступление его через органы дыхания. Соединения бериллия, находящиеся в воздухе в виде высокодисперсной пыли, тумана, газов, могут быть причиной возникновения и развития заболеваний легких и верхних дыхательных путей.

Воздействие на организм человека массивных доз бериллия и его соединений может привести к тяжелым острым поражениям легких и верхних дыхательных путей (пневмония, бронхит, бронхиолит, ларингит, фарингит и т.д.). Длительное воздействие относительно малых концентраций

соединений бериллия может приводить к возникновению и развитию хронических заболеваний легких, характеризующихся возникновением легочного фиброза - бериллиоза. Клинические проявления этого заболевания и его течение имеют ряд специфических черт, которые отличают его от других профессиональных легочных заболеваний. Развитие заболевания, тяжесть и прогрессирование болезни весьма часто не зависит от продолжительности контакта, действующей концентрации и находится в прямой зависимости от индивидуальной чувствительности организма. Наряду с явлениями поражения легочного аппарата имеет место поражение других органов и систем. Это заболевание может развиваться постепенно, даже через несколько лет после окончания работы с бериллием. Растворимые соединения бериллия при попадании на кожу могут вызывать поражение кожного покрова и слизистых оболочек верхних дыхательных путей и глаз (дерматиты, экземы, конъюнктивиты, назофарингиты и т.д.). Попадание мелких частиц бериллия в ссадины, раны, порезы кожного покрова может приводить к развитию длительно незаживающих язвочек.

Для обеспечения безопасных условий труда при работе с бериллием и его соединениями в производственных и лабораторных условиях необходимо выполнение следующих санитарно- гигиенических требований

6.6.1 Санитарно-гигиенические требования к технологическим процессам и оборудованию

– Технологический процесс производства изделий из окиси бериллия, бериллия, сплавов (содержание Be 20% и более) должен быть организован таким образом, чтобы все рабочие операции производились поточно, в непрерывной замкнутой системе, что позволит максимально механизировать и герметизировать наиболее опасные технологические операции. В целях уменьшения выделения пыли при работе с изделиями из окиси бериллия последние должны подвергаться обеспыливанию в ультразвуковых ваннах.

– Станочное оборудование, предназначенное для механической обработки бериллия и его сплавов (токарные, фрезерные, строгальные и другие станки), должно быть обеспечено местными вытяжными устройствами со специальными насадками или укрытиями, обеспечивающими удаление образующейся пыли.

– Все рабочие операции, связанные с обработкой сухих порошкообразных продуктов, должны осуществляться в специальных герметичных боксах, находящихся под разрежением, исключающих наличие открытых рабочих проемов. Боксы должны снабжаться приборами для постоянного контроля за разрежением.

– Агрегаты шлифовальной обработки бериллия и его сплавов (содержание Be более 20%) должны быть размещены в изолированном помещении и оборудованы полным укрытием зоны размещения обрабатываемой детали и абразивного инструмента, обеспеченным местной вытяжной вентиляцией. Проведение шлифования влажным способом не исключает устройства данного укрытия.

– Горячее прессование, плавку и литье бериллия и сплавов на его основе, как правило, производить в вакуумных электронно-лучевых, зонной плавки, печах. В исключительных случаях разрешается вести эти процессы в индукционных, дуговых и печах сопротивления, находящихся под разрежением и обеспеченных местной вытяжной вентиляцией.

– Приготовление и развес шихтовых материалов должны производиться в специальных боксах. Перенос шихты из бокса в печь производить в закрытой таре.

6.6.2 Требования к вентиляции

Устройство вентиляционных систем должно осуществляться в зависимости от характера технологического процесса одновременно с правильным конструктивным оформлением технологического оборудования.

Вытяжные и приточные вентустановки, предназначенные для участков и цехов по обработке бериллия и его сплавов (содержание Be 20% и более), должны быть строго обособленными и не сообщаться с другими вентиляционными системами.

Наиболее целесообразно применять следующие виды вентиляционных устройств:

а) герметичные перчаточные боксы с форкамерами для обработки порошкообразных соединений бериллия. В боксах должно поддерживаться разрежение в 20 мм вод. ст.;

б) укрытия шлифовальных станков со скоростью движения воздуха в щелях не менее 1,5 м/с;

в) местные отсосы от станочного оборудования (токарные, фрезерные, строгальные, сверлильные и другие станки), снабженные специальными насадками, обеспечивающими полное удаление пыли с места ее образования. Скорость движения воздуха в приемных оголовках местных отсосов определяется расстоянием от обрабатываемой детали, скоростью резания и характером образующихся аэрозолей и должна составлять от 20 до 50 м/с. Следует предусматривать автоматизацию и блокировку оборудования для одновременной работы его с вентиляцией;

г) вытяжные шкафы, предназначенные для лабораторных работ с соединениями бериллия. Скорость движения воздуха в рабочих проемах шкафов должна быть не менее 1,5 м/с.

6.6.3 Меры личной гигиены и средства индивидуальной защиты

Все лица, работающие в изолированных помещениях, должны быть обеспечены полным комплектом спецодежды. Периодичность смены спецодежды зависит от конкретных условий труда и устанавливается на местах

Для защиты органов дыхания от проникновения в организм соединений бериллия применяются: противопылевые респираторы, противогазы (изолирующие или шланговые), пневмошлемы и пневмокостюмы. Все лица, работающие с соединениями бериллия, где возможно поступление в организм аэрозолей, должны быть обеспечены респираторами ШБ-1 "Лепесток". Лица, подвергающиеся воздействию дымов или паров бериллия и его соединений, должны снабжаться противогазами, пневмошлемами или пневмокостюмами. Пневмокостюмы следует применять также при проведении ремонтных работ, при чистке вентиляционных очистных установок, чистке вакуумных печей.

Выполнение операций, связанных с загрязнением рук растворимыми соединениями бериллия, должно производиться в перчатках. В случае загрязнения рук указанными соединениями необходимо тотчас же тщательно вымыть руки.

Вид выдаваемых перчаток (резиновые, хлорвиниловые, асбестовые рукавицы и т.д.) должен соответствовать роду выполняемых работ. Для предупреждения потения рук и профилактики возникновения дерматитов на кистях рук целесообразно пользоваться хлопчатобумажными перчатками, которые должны надеваться под резиновые.

Все лица, работающие с бериллием и его соединениями, должны тщательно следить за состоянием кожи рук, всячески предупреждать порезы, ссадины, царапины, ожоги.

Лица, работающие в изолированных помещениях, должны после окончания работы пройти санитарную обработку в душевых.

Уход в производственной спецодежде или вынос ее домой для стирки воспрещается. Стирка спецодежды лиц, занятых на работах с бериллием и его соединениями, должна осуществляться в заводских или городских прачечных, занимающихся стиркой производственной одежды, при условии выделения для этой цели отдельных стиральных машин или рабочей смены. Стирка спецодежды, загрязненной бериллием, в прачечных, принимающих

белье от населения, категорически запрещается. При организации отдельных участков или цехов по обработке бериллия или его сплавов на предприятиях (при отсутствии заводских и городских прачечных) следует предусматривать помещения для прачечной при участках и цехах.

Прием и хранение продуктов питания, а также курение в помещениях, где выполняются работы с бериллием, запрещается. В помещение столовой или буфетов не должны допускаться лица в спецодежде.

Все работающие с бериллием и его соединениями должны быть ознакомлены с правилами работы и мерами личной гигиены. В процессе работы этот инструктаж должен периодически повторяться (1 раз в 3 мес.) с последующей проверкой знаний.

Ответственность за выполнение правил личной гигиены и правильное использование средств индивидуальной защиты возлагается на администрацию предприятий [50].

7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель дипломной работы: проведение исследование физико-механических свойств прототипа конструкционного материала из бериллида хрома для термоядерного реактора demo.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта по разработке конструкционного материала из бериллида хрома.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
- 2) Провести анализ конкурентных технических решений.

- 3) Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
- 4) Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
- 5) Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
- 6) Рассчитать бюджет научного исследования.
- 7) Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

7.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести международные демонстративные проекты по созданию электростанции, использующей термоядерный синтез.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования специфических конструкционных материалов. Результаты сегментирования представлены в рисунке 7.1.

		Конструкционный материал на основе бериллида хрома			
		Термоядерная энергетика	Военные разработки	Научная отрасль	Металлургия
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 7.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию ультракороткоживущих изотопов

Из анализа карты можно сделать вывод, что наибольшую потребность в данных конструкционных материалах испытывают отрасли, связанные с термоядерным синтезом. На данный момент необходимы исследования, связанные с использованием термоядерного синтеза. С учетом неограниченности ресурса термоядерной энергетики, проект по созданию термоядерного реактора может решить проблемы углеводородной энергетики.

7.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в разрабатываемый объект. Чтобы выявить ресурсоэффективность разработки и определить направления для ее будущего повышения, необходимо провести анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 7.1. В таблице представлены следующие показатели конкурентоспособности: разрабатываемый конструкционный материал из бериллида хрома (Ф), конструкционный материал на основе бериллия (к1). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – слабая позиция, а 5 – сильная. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 7.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б ф	Б к1	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6

Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1.Повышение производительности труда	0, 25	5	4	1,25	1
2.Удобство в эксплуатации	0, 12	4	4	0,48	0,4 8
3. Энергоэкономичность	0, 10	4	3	0,4	0,3
4. Надежность	0, 12	4	2	0,48	0,2 4
5.Простота эксплуатации	0, 14	4	5	0,56	0,7
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0, 07	5	5	0,35	0,3 5
2. Уровень проникновения на рынок	0, 07	3	2	0,21	0,1 4
3. Цена	0, 08	5	3	0,4	0,2 4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0, 05	3	3	0,15	0,1 5
Итого	1	3 7	3 1	4,28	3,6

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

(7.2.1)

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Коэффициент конкурентоспособности предприятия:

$$k_K = \frac{K_\phi}{K_{кр}} = \frac{4,28}{3,6} = 1,19.$$

(7.2.2)

Так как $k_K > 1$, следовательно, предложенный состав конструкционного материала конкурентоспособен. На данный момент используемым конструкционным материалом для реактора ДЕМО является бериллий. Результаты данной магистерской работы могут быть внедрены в проектирование реакторной установки.

7.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В таблице 7.2 приведена матрица SWOT-анализа для конструкционного материала из бериллида хрома.

Таблица 7.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны</p> <p>С1. Инновационное исследование</p> <p>С2. Высокая степень поддержки государством</p> <p>С3. Внедрение в производство позволит увеличить КПД реактора.</p>	<p>Слабые стороны</p> <p>Сл1. Затраты на отработку технологии.</p> <p>Сл2. Высокая себестоимость исходных материалов.</p>
<p>Возможности</p> <p>В1.</p>	<p>В1С1</p> <p>Повышение</p>	<p>В2Сл1</p> <p>Выделение из</p>

Использование в качестве отражателя. В2. Привлечение иностранных инвесторов.	коэффициента размножения нейтронов. В1С3 Использование меньшего кол-ва топлива и его регенерацию. В2С2 Возможность финансирования международных фондов	международного фонда средств на исследование физика-механических свойств. В1Сл2 Компенсация затрат за счет увеличения КПД реактора.
Угрозы У1. Параллельная разработка конкурентных технических решений. У2. Повышенные требования к эксплуатационным свойствам.	У1С1 Замена использующегося КМ на более новый. У2С2 Возможность государственного финансирования исследований механических свойств.	У1Сл1 Использование бериллия как прошедшего проверку материал. У2Сл2 Возможность появления более дешевого КМ при таких же эксплуатационных параметрах.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Необходимо полное исследование эксплуатационных параметров бериллида хрома как КМ и как отражатель;
2. Необходимо добиться финансирования исследований из международного фонда развития энергетики.

7.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Далее была проведена оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснение уровня собственных знаний для ее проведения. Для этого была заполнена специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенций разработчика научного проекта. Форма представлена в таблице 7.3

Таблица 7.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

	Наименование	Степень	Уровень
--	--------------	---------	---------

п/п		проработанности научного проекта	имеющихся знаний у разработчика
.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
.	Определены перспективные направления коммерциализации научно- технического задела	3	4
.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	5
.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	4
0.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	5
1.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	3
2.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	5	5
3.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
4.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	5
5.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	61

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (7.4.1)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации данного НТИ находится выше среднего уровня. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования

коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

7.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок:

- Торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе.

- Передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

- Инжиниринг предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг.

- Франчайзинг, т.е. передача или переуступка разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

- Организация собственного предприятия.

- Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

- Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

- Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Таким образом, для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как

торговля патентными лицензиями. Так как лицензиар не вкладывает собственных средств в производство, следовательно, не несет расходов по сбыту и т.д. Поскольку НТИ проводится при финансировании предприятия УМЗ, то такая технология использования КМ может быть передана третьим лицам (электростанциям с термоядерным реактором) с последующим правом его использования с учетом интересов лицензиата. Как правило, лицензиатом выступает национальная кампания Казатомпром, заинтересованная в получении инвестирования со стороны международных фондов энергетики.

7.6 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1) Цели и результат проекта.

Приведем информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Частные инвесторы	Увеличение КПД термоядерного реактора.
Казатомпром	Получение наилучших эксплуатационных свойств конструкционного материала.

В таблице 7.5 представлена информация об иерархии целей проекта и критерия достижения целей.

Таблица 7.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Проведение исследование физико-механических свойств прототипа конструкционного материала из бериллида хрома для термоядерного реактора demo
Ожидаемые результаты проекта:	Получение более лучшего конструкционного материала
Критерии приемки результата проекта:	Приемлемые эксплуатационные свойства
Требования к результату проекта:	Требование:
	Надежные механические свойства
	Малое паразитное поглощение

2) Организационная структура проекта.

Далее определены участники рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Рабочая группа проекта

п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функци и	Трудозат раты, час.
	Головков Н.И., УМЗ, инженер- исследователь	Исследов ание механических свойств	Основно й разработчик проекта	392
	Ударцев С.В., УМЗ, начальник лаборатории	Консульт ации по основным вопросам темы	Научны й руководитель проекта	624
ИТОГО:				1016

3) Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Данная информация представлена в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	660102,4 рублей

3.1.1. Источник финансирования	УМЗ, Казатомпром
3.2. Сроки проекта:	4 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	1.02.2021
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2021

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта.

7.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	аб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания		Составление и утверждение задания	И, НР
		Календарное планирование работ по теме	И, НР
		Изучение материалов по заданной тематике	И
Выбор направления исследований		Анализ литературных источников по конструкционным материалам	И
		Выбор методов анализа эксплуатационных свойств	И, НР
Теоретические и экспериментальные		Проведение анализа физико-механических свойств	И, НР

исследования		Анализ полученных результатов	И, НР
Обобщение и оценка результатов		Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта был построен календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Календарный план проекта

од работ ы	Названи е	Д лительнос ть, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
	Составл ение и утверждение задания магистерской диссертации	1	1.02.20 21	2.02.2 021	Головко в Н.И. Ударцев С.В.
	Календа рное планирование работ по теме	3	3.02.20 21	5.02.2 021	Головко в Н.И. Ударцев С.В.
	Изучени е материалов по теме исследования	1 9	8.02.20 21	26.02. 2021	Головко в Н.И.
	Анализ литературных источников по применению бериллиада хрома	1 5	1.03.20 21	15.03. 2021	Головко в Н.И.
	Выбор методов анализа эксплуатационн ых свойств	1 5	16.03.2 021	31.03. 2021	Головко в Н.И. Ударцев С.В.
	Проведе ние анализа физико- механических свойств	4 0	1.04.20 21	10.05. 2021	Головко в Н.И. Ударцев С.В.
	Анализ полученных результатов	1 5	11.05.2 021	25.05. 2021	Головко в Н.И. Ударцев С.В.
	Составл ение отчета по работе	5	26.05.2 021	31.05. 2021	Головко в Н.И.

ИТОГО:	13			
--------	----	--	--	--

Диаграмма Ганта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 7.10 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 7.10 – Календарный план-график проведения работ

код работ	Вид работ	Исполнители		Продолжительность выполнения работ											
				февраль			март			апрель			май		
	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	Научный руководитель, инженер													
	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер													
	Изучение материалов по теме исследования	Инженер													
	Анализ литературных источников по материалам мишени	Инженер	0												
	Выбор методов анализа эксплуатационных свойств	Научный руководитель, инженер													
	Проведение анализа	Научный	5												

	физико-механических свойств	руководитель, инженер														
	Анализ полученных результатов	Научный руководитель, инженер	0													
	Составление отчета по работе	Инженер														

■ – инженер, ■ – научный руководитель.

Таким образом, был построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

7.8 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку. Эти данные представлены в таблице 7.11

Таблица 7.11 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага,	Пач	1	295	295

формат А4	ка			
Картридж для принтера	Шт	1	2650	2650
Программн ое обеспечение Windows	Шт	1	13000	13000
Бериллид хрома*	кг	2	15000 0	300000
Итого:				315945

* – данное значение является модельным и не отражает реальной стоимости материала

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (инженера) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (7.8.1)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (7.8.2)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_p, \quad (7.8.3)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_p – районный коэффициент, равный 1 (г. Усть-каменогорск).

Таблица 7.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней – выходные дни – праздничные дни	120	120
Потери рабочего времени: – отпуск – невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	245	245

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$З_{\text{м}} = 50000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1 = 65000 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{65000 \cdot 10,4}{245} = 2759,2 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 2759,2 \cdot 49 = 135200 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$З_{\text{м}} = 30000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1 = 39000 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{39000 \cdot 10,4}{245} = 1655,5 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 1655,5 \cdot 78 = 129129,8 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 7.13.

Таблица 7.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель и	Оклад, руб.	пр	р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	р, аб. дн.	З _{ос} , руб.
Научный руководитель	50000	,3		65000	2759,2	9	135200
Инженер	30000	,3		39000	1655,5	8	129129,8
Итого:							264329,8

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [51].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (7.8.4)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30.2%.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 7.14.

Таблица 7.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	135200
Инженер	129129,8
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	79827,6

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 7.15.

Таблица 7.15 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	315945
Основная заработная плата	264329,8
Отчисления во внебюджетные фонды	79827,6
Бюджет затрат:	660102,4

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата

руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 660102,4 рублей.

7.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (7.9.1)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (7.9.2)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 7.16.

Таблица 7.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Теку щий проект	Ана лог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	3
3. Помехоустойчивость	0,2	4	3

4. Энергосбережение	0,15	4	4
5. Надежность	0,35	5	4
6. Материалоемкость	0,1	5	3
Итого:	1	26	19

$$I_{\text{тп}} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,35 + 5 \cdot 0,1 = 4,45$$

$$I_{\text{аналог}} = 2 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,1 = 3,4$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{\text{исп.}i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{исп.}i}^{\text{финр}}} \quad (7.9.3)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{ср}} \\ = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} \end{aligned} \quad (7.9.4)$$

Таблица 7.17 – Сравнительная эффективность разработки

п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,45	3,4
	Интегральный показатель эффективности	4,15	3,6
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,3	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый конструкционный материал из бериллида хрома является более

экономически выгодным по сравнению с эксплуатируемым в данный момент, основываясь на показателях эффективности.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1) Потенциальными потребителем результатов исследования является электростанция с термоядерным реактором демо. Сегментирование рынка осуществляется по следующему критерию: потребность в результате НТИ.

2) В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что разрабатываемый конструкционный материал для термоядерного реактора является более предпочтительным, чем используемый на данный момент.

3) Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. Сильными сторонами НТИ являются: высокая степень поддержки государством и увеличение КПД реакторной установки. Возможности: использование бериллида в качестве отражателя и привлечение иностранных инвесторов. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

4) Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала уровень выше среднего. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

5) В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

6) При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 660102,4 рублей.

7) Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

Заключение

Проведен литературный обзор применения интерметаллидов бериллия и конструкционного исполнения термоядерных реакторов ITER и DEMO.

Подготовлены к работе образцы и испытательное оборудование.

Проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств образцов бериллида хрома. Для образцов определены основные физико-механические свойства, представленные в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Физико-механические свойства образцов бериллида хрома

Параметр	Значение
Фазовый состав	CrBe ₁₂
Плотность, г/см ³	2,42
Микротвердость, HV	1108
Средний условный размер зерна, мкм	17,11
КТЛР, К ⁻¹ (200-1000 °С)	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Предел прочности на сжатие, МПа	229,327
Предел прочности на изгиб, МПа	111,765

Полученные значение согласуются с теоретическими. При этом, значение КТЛР превосходит данное значение для чистого бериллия ($1,51 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹) и для различных стальных и алюминиевых сплавов ($1,5 \cdot 10^{-5}$ - $2,1 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о возможности использования данного интерметаллида в экстремальных условиях, которые будут обусловлены режимами работы термоядерного реактора DEMO.

Для дальнейших исследований и рассмотрения вопроса применения бериллида хрома в качестве блока blankets размножителя в термоядерном реакторе, необходим статистический набор результатов испытаний, а также другие испытания, в частности испытание на распухание при нейтронном облучение. Данный параметр является одним из ключевых, поскольку чистый бериллий непригоден для длительного использования в качестве

блока blankets размножителя по причине сильного распухания и ухудшении ядерных и механических свойств.

Список публикаций

1. Ушаков И.А., Вавилов А.В., Головков Н.И. Разделение катионов магния и стронция под действием внешнего периодического электрического поля. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов 4 Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 30 октября – 3 Ноября 2017. – Томск: Графика, 2017 – С.76.

2. Головков Н.И., Ушаков И.А., Тимченко С.Н. Изучение возможности разделения изомеров органических кислот в внешнем периодическом электрическом поле. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов 4 Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 30 октября – 3 Ноября 2017. – Томск: Графика, 2017 – С.77.

3. Головков Н.И., Алюков Е.С. Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «PuO₂-UO₂-Be₂». Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов 5 Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 19 – 23 Ноября 2018. – Томск: Графика, 2018 – С.64.

4. Головков Н.И., Алюков Е.С. Исследование порошков оксидов редких и рассеянных элементов, синтезированных в условиях воздушной плазмы высокочастотного факельного разряда. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов 5 Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 19 – 23 Ноября 2018. – Томск: Графика, 2018 – С.54.

5. Butov, V., Timchenko, S., Ushakov, I., Golovkov, N., Poberezhnikov, A.

Hydralulic and separation characteristics of an industrial gas centrifuge calculated with neural networks / AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1938, Article number 020019. – p. 1-5.

6. Головков Н.И. Новоселов И.Ю. Синтез оксида иттрия в высокочастотной плазме факельного разряда. Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XX Международной научно-практической конференции имени профессора П.П. Кулева студентов и молодых ученых. Томск. 20-23 мая 2019. Томск: ТПУ, 2019 – С.414-415.

7. Головков Н.И., Тихонов А.Е., Новоселов И.Ю. Исследование порошка оксида иттрия, синтезированного в плазме из азотнокислого раствора с добавлением органического компонента. VIII Молодежная конференция ИОХ РАН: сборник тезисов докладов, Москва, 22-23 Мая 2019. – Москва: МАКС Пресс, 2019 – С.183.

8. Hongda Li, Sergey Sosnovskiy, Mishik Kazaryan, Victor Sachkov, Almas Abdiyanov, Nikita Golovkov Separation of chemical elements with the electrochemical processes on asymmetric current / AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2101, Article number 020014. – p. 1-6.

9. Karengin, A., Karengin, A., Novoselov, I., Golovkov, N., 18 Apr 2019, V International Conference for Young Scientists, Post-Graduate Students and Students Isotopes: Technologies, Materials and Application, ITMA 2018. Martoyan, G. A., Godymchuk, A. & Rieznichenko, L. (eds.). American Institute of Physics Inc., 020016. (AIP Conference Proceedings; vol. 2101).

10. Головков Н.И. Тихонов А.Е. Новоселов И.Ю. Утилизация и иммобилизация отходов переработки отработавшего ядерного топлива в матрице из хлоридов металлов в условиях высокочастотной плазмы. VIII-я международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», сборник тезисов докладов, Москва, 15-20 апреля 2019 г. – Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019 – С. 111-112.

11. Шаманин И.В. Казарян М.А. Тимченко С.Н. Бутов В.Г. Ушаков И.А. Головков Н.И. Теоретическое обоснование эффекта индуцированного дрейфа ионов под действием внешнего периодического электрического поля. Тезисы докладов международной конференции «Экстракция и мембранные

методы в разделении веществ», посвященная 90-летию со дня рождения академика Б.А. Пурина. Москва, 03 декабря 2018 г. – Москва, Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева. 2018. – С.117-118.

12. Головков Н.И. Новоселов Н.Ю. Получение наноструктурного Y_2O_3 в высокочастотной плазме из отработавшего ядерного топлива. Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине (ФТПНПМ-2019). Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 30 сентября – 04 октября 2019 г. – Томск. Изд-во ТПУ, 2019. – С.118.

13. Головков Н.И. Новоселов И.Ю. Плазменная переработка горючих отходов замкнутого ядерного топливного цикла. Сборник материалов научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследования к внедрению – 2019», Нижний Новгород, 17-18 октября 2019 г., Нижний Новгород: Изд-во Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С.109-110.

14. Головков Н.И. Тихонов А.Е. Новоселов И.Ю. Исследование возможности иммобилизации отходов переработки отработавшего ядерного топлива в матрице из хлоридов металлов в условиях высокочастотной плазмы. Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий», Северск, 08-12 апреля 2019г. Москва: Изд-во Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. – С.22.

15. Головков Н.И., Сосновский С.А. очистка техногенных растворов в условиях высокотемпературного распылительного реактора. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 26–29 октября 2020 г. – Томск : Томский политехнический университет, 2020. – С. 86.

16. Головков Н.И., Сосновский С.А., Кудабаяев Б.Б. Исследование процесса очистки руд при воздействии высоковольтного импульсного разряда. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 26–29 октября 2020 г. Томск : Томский политехнический университет, 2020. – С. 87.

17. Головков Н.И., Сосновский С.А., Сачков В.И. Электроэкстракционно-плазменная технология очистки и переработки руд, содержащих редкоземельные элементы. Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 26–29 октября 2020 г. Томск : Томский политехнический университет, 2020. – С. 88.

18. Sosnovskiy, A. Lukanin, A. Tskhe, A. Tskhe, V. Sachkov and N. Golovkov, "Creation of Non-stationary Volume Discharge Inside Cylindrical Microwave Resonator," 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, 2020, pp. 83-86, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242046.

19. С.А. Сосновский, А.А. Цхе, А.А. Цхе, А.А. Луканин, В.И. Сачков, Н.И. Головков. Удаление органических соединений из водных сред в условиях воздействия активных радикалов, созданных в плазме атмосферного СВЧ-разряда. Сборник тезисов докладов XI Международной конференции «Химия нефти и газа», посвященной 50-летию ИХН СО РАН. Томск, 28 сентября - 2 октября 2020 г..

20. Н.И. Головков, С.В. Ударцев, М.А. Подойников, М.К. Кылышканов. Опыт получения бериллидов хрома и титана на АО «УМЗ». Сборник тезисов докладов I Международной научной школы-конференции «Атом. Наука. Технологии». Алматы, 14-16 апреля 2021г, с. 16.

21. Тихонов А.Е., Головков Н.И., Беспала Ю.Р., Новоселов И.Ю. Плазменная утилизация горючих отходов переработки отработавшего

ядерного топлива замкнутого ядерного топливного цикла. Сборник тезисов докладов I Международной научной школы-конференции «Атом. Наука. Технологии». Алматы, 14-16 апреля 2021г., с. 70.

Список использованных источников

1. Бериллий // Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — Т. 1: А—Дарзана. — С. 280. — 623 с.
2. Metallurgie leichter Metalle. Bejaev A.I. Изд-во «Металлургия», 1970, 6-е изд. 368 с.
3. Дж. Дарвин, Дж. Баддери, Бериллий, ИЛ., М., 1962.
4. Реми Г. Курс неорганической химии. Т. 2. М., Мир, 1966. С. 142—180
5. Плинер Ю. Л., Игнатенко Г. Ф., Лаппо С. И. Metallurgie des Chroms. — М.: Metallurgie, 1965. — 184 с.
6. Chem. a. Eng. News, 39, № 46, 65 (1961), см. Атомная энергия, 13, № 1 (1962).
7. F. Eisenkolb , Fortschritte der Pulvermetallurgie, Band II, Akademie Verlag, Berlin, 1963, стр. 851.
8. Metallkunde reaktorischer Materialien, Übersichten des Inst. f. Btuttl, Band III, «Materialien des Moderators, Reflektors und regulierender Vorrichtungen». Atomizdat. M., 1962.
9. L. Misch , Metallwirtschaft, 15, 163 (1936).
10. М. И. Захарова, П. И. Дальнов , ЖТФ, 5, 184 (1938)
11. П. И. Крипьякевич, Е. И. Гладышевский, ДАН, 104, 82 (1955).
12. Е. Е. Черкашин, Е. И. Гладышевский, П. И. Крипьякевич ,Ю. Б. Кузьма, Ж. неорг. химии, 3, 650 (1958)
13. F. Batchelder , R. Raeuch Ie, Acta Cryst., 10, с. 648 (1957)
14. A. Edwards, S. Johnstone, J. Inst. Metals, 84, с. 313 (1956)
15. J. Lewis, J. Metals, 13, 357 (1961), перев. в ж-ле Проблемы современной металлургии, 1961, № 6 (60), 98
16. B. E. Ghidersa, M. Ionescu-bujor, and G. Janeschitz, “Helium Loop Karlsruhe (HELOKA): A Valuable Tool for Testing and Qualifying ITER

Components and Their He Cooling Circuits,” *Fusion Eng. Des.*, 81, 8–14, 1471 (2006)

17. The ITER project. EFDA, European Fusion Development Agreement (2006).

18. Tirone, Jonathan (29 October 2019). "Chasing Unlimited Energy With the World's Largest Fusion Reaction". *Bloomberg Businessweek*. New York, USA: Bloomberg L.P.

19. Overton, Thomas (1 June 2020). "Fusion Energy Is Coming, and Maybe Sooner Than You Think". *Power*. Rockville, MD, USA: Power Group.

20. R. MITTEAU et al., “A Shaped First Wall for ITER,” *J. Nucl. Mater.*, 415, 1, 969 (2011)

21. "ITER Tokamak complex construction begins". *Nuclear Engineering International*. 24 June 2013. Retrieved 20 March 2021.

22. Kramer, David (16 April 2018). "ITER disputes DOE's cost estimate of fusion project". *Physics Today*. College Park, MD, USA: American Institute of Physics. doi:10.1063/PT.6.2.20180416a. Retrieved 20 March 2021.

23. Cohen, Ariel (7 August 2020). "ITER, The World's Largest Nuclear Fusion Project: A Big Step Forward". *Forbes*. New York, USA: Integrated Whale Media. Retrieved 20 March 2021.

24. "Tritium: a challenging fuel for fusion". *EUROfusion*. Retrieved 20 March 2021.

25. Indah, Rosidah M.; Zaki, Suud; Putranto, Yazid (30 September 2015). "Optimization of tritium breeding and shielding analysis to plasma in ITER fusion reactor". *AIP Conference Proceedings*. 1677. College Park, MD, USA: AIP Publishing: 070021

26. Federici, G.; Boccaccini, L.; Cismondi, F.; Gasparotto, M.; Poitevin, Y.; Ricapito, I. (1 April 2019). "An Overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort". *Fusion Engineering and Design*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 141: 30–42.

27. Hanaor, D.A.H.; Kolb, M.H.H.; Gan, Y.; Kamlah, M.; Knitter, R. (2014). "Solution based synthesis of mixed-phase materials in the Li_2TiO_3 - Li_4SiO_4 system". *Journal of Nuclear Materials*. 456: 151–161
28. Dulon, Krista (7 November 2016). "Packing a Punch". ITER Newline. St. Paul-lez-Durance, France: ITER.
29. Kuznetsov, Vladimir; Gorbenko, Aleksandr (1 October 2014). "Status of the IDTF high-heat flux test facility". *Fusion Engineering and Design*. Amsterdam,
30. Gibney, Elizabeth (22 February 2021). "Fuel for world's largest fusion reactor ITER is set for test run". *Nature*. London, England: Springer Nature Group
31. Hiwatari, R.; Okano, K.; Asaoka, Y.; Shinya, K.; Ogawa, Y. (2005). "Demonstration tokamak fusion power station for early realization of net electric power generation". *Nuclear Fusion*. 45 (2): 96
32. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Bringing fusion to the U.S. grid. ISBN 978-0-309-68538-2
33. Cardozo, N. J. Lopes (4 February 2019). "Economic aspects of the deployment of fusion energy: the valley of death and the innovation cycle". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 377 (2141): 20170444
34. Banacloche, Santacruz; Gamarra, Ana R.; Lechon, Yolanda; Bustreo, Chiara (15 October 2020). "Socioeconomic and environmental impacts of bringing the sun to earth: A sustainability analysis of a fusion power plant deployment". *Energy*. 209: 118460
35. Carayannis, Elias G.; Draper, John; Bhaneja, Balwant (2 October 2020). "Towards Fusion Energy in the Industry 5.0 and Society 5.0 Context: Call for a Global Commission for Urgent Action on Fusion Energy". *Journal of the Knowledge Economy*
36. Liu, Xiaogang; Wang, Zhaoliang; Ren, Yong; Li, Junjun; Yin, Dapeng; Li, Lei; Gao, Xiang; Wu, Yu (1 January 2018). "Mechanical performance

evaluation of the CFETR central solenoid model coil design". Nuclear Fusion. 58 (1): 016035

37. Kemp, R.; Wenninger, R.; Federici, G.; Reimerdes, H.; Ambrosino, R.; Brown, R.; Coleman, M. (2018). "Exploring a broad spectrum of design options for DEMO". Fusion Engineering and Design. 136: 970–974

38. Taylor, Neill; Ciattaglia, Sergio; Coombs, Dave; Jin, Xue Zhou; Johnston, Jane; Liger, Karine; Mazzini, Guido; Mora, Juan Carlos; Pinna, Tonio; Porfiri, Maria Teresa; Urbonavicius, Egidijus (2019). "Safety and environment studies for a European DEMO design concept". Fusion Engineering and Design. 146: 111–114

39. F. A. Hernández et al., "A New HCPB Breeding Blanket for the EU DEMO: Evolution, Rationale and Preliminary Performances," Fusion Eng. Des., 124, 882 (2017)

40. F. Cismondi et al., "Progress in EU Breeding Blanket Design and Integration," Fusion Eng. Des., 136, Part A, 782 (2018)

41. F. Cismondi et al., "Progress in EU Breeding Blanket Design and Integration," Fusion Eng. Des., 136, Part A, 782 (2018)

42. Н.И. Головков, С.В. Ударцев, М.А. Подойников, М.К. Кылышканов. Опыт получения бериллидов хрома и титана на АО «УМЗ». Сборник тезисов докладов I Международной научной школы-конференции «Атом. Наука. Технологии». Алматы, 14-16 апреля 2021г, с. 16

43. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шапаваова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

44. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

45. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.

46. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».
47. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
48. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
49. Пожаро- взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.
50. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.
51. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шапаваова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

Приложение А
(справочное)

**Investigation of the physical and mechanical properties of the
prototype of the structural element for the DEMO fusion reactor**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Головков Никита Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОТЯЦ	Каренгин Александр Григорьевич	к.т.н., доцент		

Консультант ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник ЛБ НЦ АО «УМЗ»	Ударцев С.В.			

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ	Шайкина Ольга Игоревна	—		

Contents

A1 ITER	104
A1.1 General information	104
A1.2 Objectives	105
A1.3 Technical design.....	106
A1.3.1 Vacuum vessel.....	106
A1.3.2 Breeder blanket.....	107
A1.3.4 Magnet system.....	109
A1.3.5 Additional heating	109
A1.3.6 Cryostat	110
A1.3.7 Divertor	110
A1.3.8 Cooling systems	111
A2. DEMO	111
A2.1 General information	111
A2.2 Design approach.....	112
A2.2.1 Recap of main technology & design integration issues	112
A2.3 Main achievements.....	113
A2.3.1 Breeding blanket (WPBB)	113
A2.3.2 Divertor (WPDIV).....	114
A2.3.3 Tritium fuelling and vacuum (WPTFV)	114
A2.3.4 HCPB fuel-breeder pin concept	115
A2.4. Application of beryllium in thermonuclear power engineering.....	117
A2.4.1 Experience of obtaining titanium beryllide at JSC "UMP"	117

A1 ITER

A1.1 General information

ITER is an international nuclear fusion research and engineering megaproject that will be the world's largest magnetic confinement plasma physics experiment. It is an attempt to replicate the fusion processes of the sun to create energy on earth by using an experimental tokamak nuclear fusion reactor that is being built next to the Cadarache facility in the South of France [16, 17]. The primary goal of ITER is to demonstrate the scientific and technological feasibility of safe, clean, and unlimited fusion energy for peaceful use [16]. ITER will also test new technologies such as tritium breeding in a real fusion environment and its results are intended to bolster the global nuclear fusion industry [18]. The name 'ITER' stands for International Thermonuclear Experimental Reactor but the project also uses the Latin definition of the word 'iter', meaning 'the way' or 'the path' [19].

The ITER thermonuclear fusion reactor has been designed to use 50 megawatts of heating power to create a plasma of 500 megawatts (thermal) for periods of 400 to 600 seconds [20]. This would mean a ten-fold gain of plasma heating power or, as measured by heating input to thermal output, $Q \geq 10$ [21]. The current record for energy production using nuclear fusion is held by the Joint European Torus reactor in Culham, UK, which injected 24 megawatts of heating power to create a 16-megawatt plasma, for a Q of 0,67 [22]. Thereby, the ITER machine aims to demonstrate, for the first time in a fusion reactor, the principle of producing more thermal power than is used to heat the plasma. However, beyond just heating the plasma, the total electricity consumed by the reactor and facilities will range from 110 MW up to 620 MW peak for 30-second periods during plasma operation [23]. Furthermore, being a research reactor, thermal-to-electric conversion is not intended, and ITER will not produce sufficient power for net

electrical production. Instead of being sent to generate electricity, the heat emitted by the plasma will be vented [24].

The ITER project is funded and run by seven member parties: the European Union, China, India, Japan, Russia, South Korea, and the United States, with the United Kingdom and Switzerland participating through Euratom. In total, the ITER project encompasses 35 countries that represent half the world's population and 85% of global GDP. ITER also has cooperation agreements with Australia, Kazakhstan, and Canada [25]. Construction of the ITER complex started in 2013[16] and assembly of the tokamak began in 2020 [26]. The initial budget for ITER was close to €6 billion, but now the total price of construction and operations for ITER is expected to be between €18 and €22 billion [27]. However, other estimates place the total cost between \$45 billion and \$65 billion, estimates that are disputed by ITER [28]. Whatever the ultimate budget, ITER has already been described as the most expensive science experiment of all time, the most complicated engineering project in human history, and one of the most ambitious human collaborations since the development of the International Space Station (€100 billion budget) and the Large Hadron Collider (€7.5 billion budget) [29.]

A1.2 Objectives

ITER's stated mission is to demonstrate the feasibility of fusion power as a large-scale, carbon-free source of energy. More specifically, the project has aims to:

- Momentarily produce a fusion plasma with thermal power ten times greater than the injected thermal power (a Q value of 10).
- Produce a steady-state plasma with a Q value greater than 5. (Q = 1 is scientific breakeven.)
- Maintain a fusion pulse for up to 8 minutes.
- Develop technologies and processes needed for a fusion power station — including superconducting magnets and remote handling (maintenance by robot).

- Verify tritium breeding concepts.
- Refine neutron shield / heat conversion technology (most of the energy in the D+T fusion reaction is released in the form of fast neutrons).

The objectives of the ITER project are not limited to creating the nuclear fusion device but are much broader, including building necessary technical, organizational, and logistical capabilities, skills, tools, enabling management of such megaprojects.

A1.3 Technical design

A1.3.1 Vacuum vessel

The vacuum vessel (fig. A1) is the central part of the ITER machine: a double-walled steel container in which the plasma is contained by means of magnetic fields.

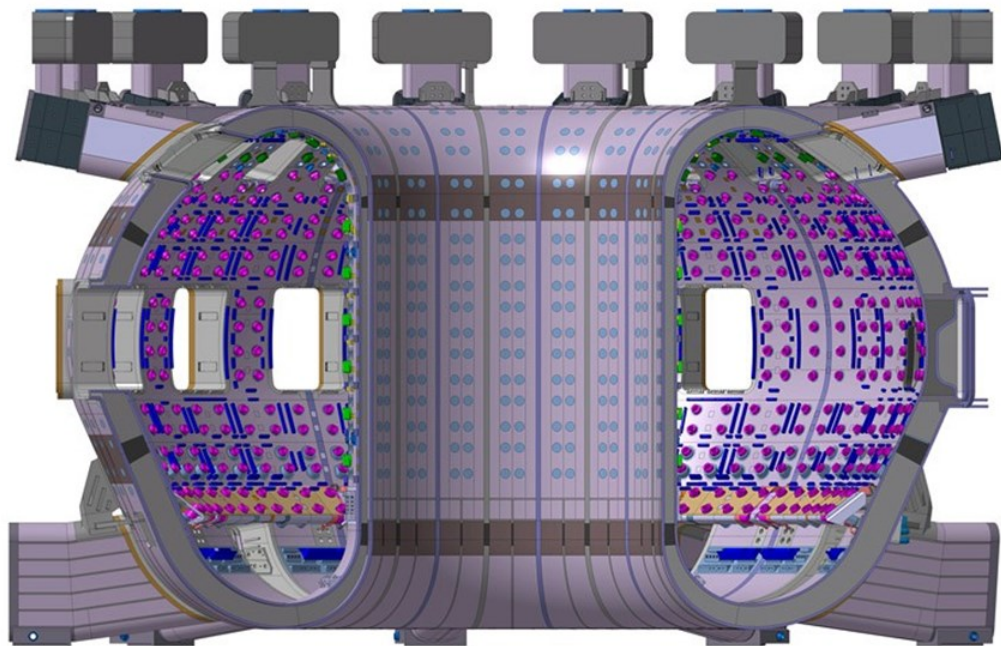


Figure A1 – The design of vacuum vessel

The ITER vacuum vessel will be twice as large and 16 times as heavy as any previously manufactured fusion vessel: each of the nine torus-shaped sectors

will weigh approximately 500 tons for a total weight of 5000 tons. When all the shielding and port structures are included, this adds up to a total of 5,116 tonnes. Its external diameter will measure 19.4 metres (64 ft), the internal 6.5 metres (21 ft). Once assembled, the whole structure will be 11.3 metres (37 ft) high [30].

The primary function of the vacuum vessel is to provide a hermetically sealed plasma container. Its main components are the main vessel, the port structures and the supporting system. The main vessel is a double-walled structure with poloidal and toroidal stiffening ribs between 60-millimetre-thick (2.4 in) shells to reinforce the vessel structure. These ribs also form the flow passages for the cooling water. The space between the double walls will be filled with shield structures made of stainless steel. The inner surfaces of the vessel will act as the interface with breeder modules containing the breeder blanket component. These modules will provide shielding from the high-energy neutrons produced by the fusion reactions and some will also be used for tritium breeding concepts.

The vacuum vessel has a total of 44 openings that are known as ports – 18 upper, 17 equatorial, and 9 lower ports – that will be used for remote handling operations, diagnostic systems, neutral beam injections and vacuum pumping. Remote handling is made necessary by the radioactive interior of the reactor following a shutdown, which is caused by neutron bombardment during operation.

Vacuum pumping will be done before the start of fusion reactions to remove all molecules and to create the necessary low density that is about one million times lower than the density of air [31].

A1.3.2 Breeder blanket

ITER will use a deuterium-tritium fuel, and while deuterium is abundant in nature, tritium is much rarer because it is a hydrogen isotope with a half-life of just 12.3 years and there is only approximately 3.5 kilograms of natural tritium on earth. Owing to this limited terrestrial supply of tritium, a key component of the

ITER reactor design is the breeder blanket (fig. A2). This component, located adjacent to the vacuum vessel, serves to produce tritium through reaction with neutrons from the plasma. There are several reactions that produce tritium within the blanket. Lithium-6 produces tritium via (n,t) reactions with moderated neutrons, while Lithium-7 produces tritium via interactions with higher energy neutrons via (n,nt) reactions [32].

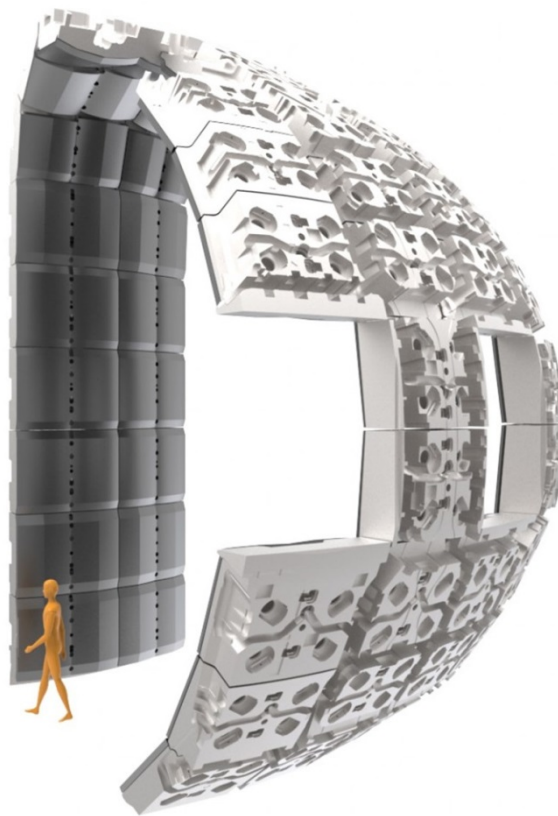


Figure A2 – The design of blanket

Concepts for the breeder blanket include helium-cooled lithium lead (HCLL), helium-cooled pebble bed (HCPB), and water-cooled lithium lead (WCLL) methods.[133] Six different tritium breeding systems, known as Test Blanket Modules (TBM), will be tested in ITER and will share a common box geometry.[134] Requirements of breeder materials include good tritium production and extraction, mechanical stability and low levels of radioactive activation.

A.1.3.4 Magnet system

ITER is based on magnetic confinement fusion that uses magnetic fields to contain the fusion fuel in plasma form. The magnet system used in the ITER tokamak will be the largest superconducting magnet system ever built. The system will use four types of magnets to achieve plasma confinement: a central solenoid magnet, poloidal magnets, toroidal-field coils, and correction coils. The central solenoid coil will be 18 meters tall, 4.3 meters wide, and weigh 1000 tons. It will use superconducting niobium-tin to carry 45 kA and produce a peak field of more than 13 tesla.

The 18 toroidal field coils will also use niobium-tin. They are most powerful superconductive magnets ever designed with a nominal peak field strength of 11.8 teslas and a stored magnetic energy of 41 gigajoules. Other lower field ITER magnets (poloidal field and correction coils) will use niobium-titanium for their superconducting elements [33].

A1.3.5 Additional heating

To achieve fusion, plasma particles must be heated to temperatures that reach as high as 150 million °C and to achieve these extreme heats multiple heating methods must be used. Within the tokamak itself, changing magnetic fields produce a heating effect but external heating is also required. There will be three types of external heating in ITER:

- Two one-million volt heating neutral beam injectors (HNB) that will each provide about 16.5MW to the burning plasma, with the possibility to add a third injector. The beams generate electrically charged deuterium ions that are accelerated through five grids to reach the required energy of 1MV and the beams can operate for the entire plasma pulse duration, a total of up to 3600 seconds. The prototype is being built at the Neutral Beam Test Facility (NBTF), which was

constructed in Padua, Italy. There is also a smaller neutral beam that will be used for diagnostics to help detect the amount of helium ash inside the tokamak.

- An ion cyclotron resonance heating (ICRH) system that will inject 20 MW of electromagnetic power into the plasma by using antennas to generate radio waves that have the same rate of oscillation as the ions in the plasma.
- An electron cyclotron resonance heating (ECRH) system that will heat electrons in the plasma using a high-intensity beam of electromagnetic radiation.

A1.3.6 Cryostat

The ITER cryostat is a large 3,850-tonne stainless steel structure surrounding the vacuum vessel and the superconducting magnets, with the purpose of providing a super-cool vacuum environment. Its thickness (ranging from 50 to 250 millimetres (2.0 to 9.8 in)) will allow it to withstand the stresses induced by atmospheric pressure acting on the enclosed volume of 8,500 cubic meters. On 9 June 2020, Larsen & Toubro completed the delivery and installation of the cryostat module. The cryostat is the major component of the tokamak complex, which sits on a seismically isolated base [34].

A1.3.7 Divertor

The divertor is a device within the tokamak that allows for removal of waste and impurities from the plasma while the reactor is operating. At ITER, the divertor will extract heat and ash that are created by the fusion process, while also protecting the surrounding walls and reducing plasma contamination.

The ITER divertor, which has been compared to a massive ashtray, is made of 54 pieces of stainless-steel parts that are known as cassettes. Each cassette weighs roughly eight tonnes and measures 0.8 meters x 2.3 meters by 3.5 meters. The divertor design and construction is being overseen by the Fusion For Energy agency.

When the ITER tokamak is in operation, the plasma-facing units endure heat spikes as high as 20 megawatts per square metre, which is more than four times higher than what is experienced by a spacecraft entering Earth's atmosphere.

The testing of the divertor is being done at the ITER Divertor Test Facility (IDTF) in Russia. This facility was created at the Efremov Institute in Saint-Petersburg as part of the ITER Procurement Arrangement that spreads design and manufacturing across the project's member countries [35].

A1.3.8 Cooling systems

The ITER tokamak will use interconnected cooling systems to manage the heat generated during operation. Most of the heat will be removed by a primary water cooling loop, itself cooled by water through a heat exchanger within the tokamak building's secondary confinement. The secondary cooling loop will be cooled by a larger complex, comprising a cooling tower, a 5 km (3.1 mi) pipeline supplying water from the Canal de Provence, and basins that allow cooling water to be cooled and tested for chemical contamination and tritium before being released into the Durance River. This system will need to dissipate an average power of 450 MW during the tokamak's operation. A liquid nitrogen system will provide a further 1300 kW of cooling to 80 K ($-193.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-315.7\text{ }^{\circ}\text{F}$), and a liquid helium system will provide 75 kW of cooling to 4.5 K ($-268.65\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-451.57\text{ }^{\circ}\text{F}$). The liquid helium system will be designed, manufactured, installed and commissioned by Air Liquide in France [36].

A2. DEMO

A2.1 General information

DEMO (DEMOstration Power Plant) is a proposed nuclear fusion power station that is intended to build upon the ITER experimental nuclear fusion reactor. The objectives of DEMO are usually understood to lie somewhere between those

of ITER and a "First Of A Kind" (FOAK) commercial power plant, sometimes referred to as PROTO.

While there is no clear international consensus on exact parameters or scope, the following parameters have been used as a baseline for design studies: DEMO should produce at least 2000 megawatts (2 gigawatts) of fusion power on a continuous basis, and it should produce 25 times as much power as required for breakeven. DEMO's design of 2 to 4 gigawatts of thermal output will be on the scale of a modern electric power station.

To achieve its goals, if utilizing a conventional tokamak design, DEMO must have linear dimensions about 15% larger than ITER, and a plasma density about 30% greater than ITER. As a prototype commercial fusion reactor, it was estimated in 2006 that DEMO could make fusion energy available by 2033, but design is now planned for the 2020s and proposed operations have now been delayed until as late as the 2050s. It is estimated that subsequent commercial fusion reactors could be built for about a quarter of the cost of DEMO. However, the ITER experience suggests that development of a multi-billion US dollar tokamak-based technology innovation cycle able to develop fusion power stations that can compete with non-fusion energy technologies is likely to encounter the "valley of death" problem in venture capital, i.e., insufficient investment to go beyond prototypes, as DEMO tokamaks will need to develop new supply chains and are labor intensive [37].

A2.2 Design approach

A2.2.1 Recap of main technology & design integration issues

ITER is a key facility in the EU strategy and the DEMO design and R &D is expected to benefit largely from the experience gained in the design, construction and operation of ITER. However, there are several differences between ITER and DEMO and there are a number of technology, physics and

licensing issues that remain to be addressed beyond ITER by DEMO. Some of the main design integration issues that bear a strong impact in defining the tokamak size and the machine configuration. Because of the cross-cutting nature of these issues they affect or have important interfaces with one or more key nuclear systems. Thus, as they have a strong impact on nuclear design, safety, maintainability and licensing, they must be studied and solved during the Pre-conceptual Design Phase. These represent design issues that cannot be addressed in isolation, but require the investigation of the variants in question within the context of the wider plant architecture and associated boundary constraints. Investigating these fully, and managing the multiple associated configurations represents one of the major challenges and efforts during the Pre-Conceptual Design Phase [38].

A2.3 Main achievements

A2.3.1 Breeding blanket (WPBB)

At the moment, four design options with different level of design and technology readiness are still considered as potential driver blankets within WPBB, utilizing helium, water, and LiPb as coolants and a solid or LiPb as tritium breeder/neutron multiplier [30,39]. The strategy is to arrive to the DEMO driver blanket down selection around the year 2024 by taking into account design and R&D input obtained not only in the area of blanket, but safety, materials, Balance of Plant, remote maintenance, etc. This will enable a DEMO plant concept to be coherently designed for a design review by 2027. For both cases with helium and water as coolant, preliminary design layouts and performance analyses of the PHTSs, and Power Conversion Systems (PCS) are being studied taking into account realistic coolant pipes layout and the required mass flow rates (see below). This enables the estimation of the coolant inventory and the associated enthalpy, which together with the PHTS system segregation and layout are essential data for progressing safety analyses and for the design of key systems like the vacuum vessel pressure suppression system (VVPSS), which is an important safety- class

component. An update of the progress on design and R&D is provided elsewhere [39].

A2.3.2 Divertor (WPDIV)

Currently, seven different divertor target design concepts are being developed with water cooling and one with helium cooling. Besides the conventional ITER-like tungsten monoblock model, advanced design concepts have been developed using novel composite materials or non-conventional design solutions. A number of small scale mock-ups were successfully manufactured by means of tailored joining methods and inspected by dedicated non-destructive test methods such as ultrasonic testing and infrared thermography. The mock-ups are being tested to evaluate high-heat-flux performance using cold as well as hot (130 °C) coolant water. The mock-ups of five target concepts withstood at least 100 load cycles at 20 MW/m² while the mock-ups of the remaining concepts are still in production or testing. The pipework of the PFC cooling circuit and the internal ribbed structure of cassette body were designed and optimised. 3D CFD analysis verified that the cooling scheme assured required power exhaust capability with a reasonable thermohydraulic performance and acceptable operation temperature range for the structural materials. Progress on the ongoing physics work including investigation of innovative divertors is described elsewhere [39].

A2.3.3 Tritium fuelling and vacuum (WPTFV)

The design of the DEMO Tritium Systems is developed considering the following guiding principles:

- Full application of the Direct Internal Recycling concept leading to two continuous re-cycle loops in addition to an outer loop with classical isotope separation and tritium plant exhaust detritiation technologies;
- Tritium inventory minimisation, requiring the continual recirculation of gases without storage, avoiding hold-ups of tritium in each process stage, and

immediate use of tritium released from tritium breeder blankets (without intermediate storage). To increase the burn-up fraction, an additional exhaust gas re-injection loop is under consideration.

- Environmental protection and dose minimization under normal operating and accident conditions.

As for the concept development and simulation of DEMO vacuum systems, the main activities include:

- Commissioning of the mechanical pump train at the JET Active Gas Handling System to be ready for operation for the initial tritium phase of the DT campaign 2018–2020. This pump unit will provide valuable lesson on the combination of a vapour diffusion type pump with a liquid ring pump, both operated with a common mercury circuit.

- Development of a first complete metal foil pump module; following the extensive characterization tests of the metal foil as such. In the area of matter injection, efforts concentrate on two candidate pellet injection concepts from the magnetic high field side to benefit as much as possible from drift effects, either using a curved guide tube system with a centrifuge, or a free flight option from the top requiring the currently less mature double stage gas gun technology [40].

A2.3.4 HCPB fuel-breeder pin concept

The fuel-breeder pins consist of inner and outer cladding formed by two concentric tubes of \varnothing i 16 and \varnothing i 60 mm with wall thicknesses of 6 and 2 mm, respectively. The volume created by the cladding is filled by an advanced ceramic breeder pebble bed, which is a mixture of Li_4SiO_4 and Li_2TiO_3 . The volume is closed by a filter plate, which allows the purge gas ($\text{He}+0.1\text{wt \% H}_2$ as reference) to flow inside the pins. The large thickness of the inner cladding is used to machine longitudinal grooves of 4-mm depth and 5-mm width and closed by an ~ 1 -mm plate (micro perforated at the front region of the pin close to the FW). The resulting ducts of 3×5 mm in the inner cladding are used as return paths of the

purge gas toward the purge gas manifolds. The volume surrounding the pressure tubes is filled with the neutron multiplier, which is Be_{12}Ti as reference and molten Pb as backup solution. As the content of Be per unit volume is lower in beryllides with respect to pure Be, it is expected that the tritium breeding ratio (TBR) is lower for Be_{12}Ti than for pure Be when the same thickness of multiplier is considered (fig. A3).

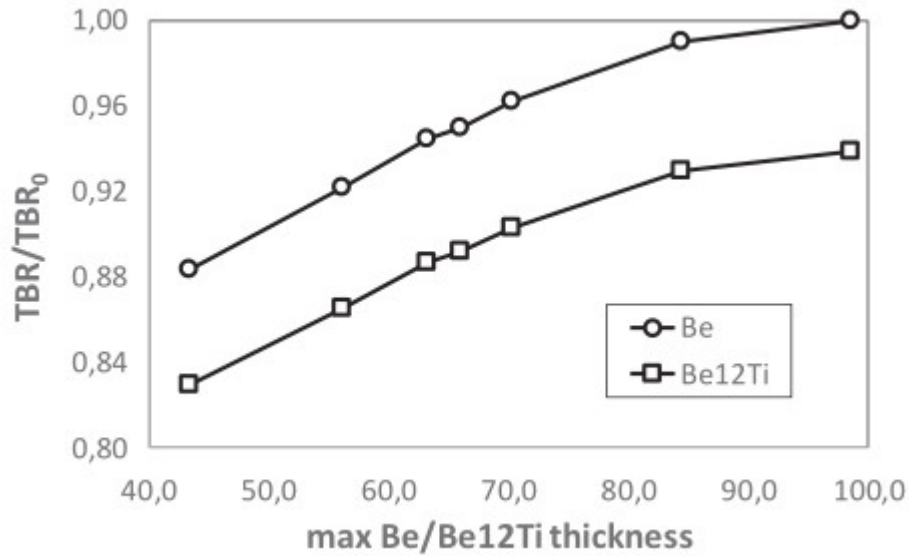


Fig. A3. Parametric analysis of TBR versus pin pitch for a HCPB based on a fuel-breeder pin with Be and Be_{12}Ti as neutron multiplier.

Figure A3 shows a plot of a normalized TBR (TBR/TBR_0) versus the maximum Be/Be12Ti thickness between fuel-breeder pins, defining TBR_0 as the TBR of Be with a thickness of 50 mm. This thickness has been chosen as reference for the normalization, as it is the maximum achievable for Be before reaching the design temperature limit of this material [$\sim 650^\circ\text{C}$] at the equatorial OB region, which is mainly driven by the excessive swelling in Be at higher temperatures. For the same thickness, the TBR with Be12Ti drops about 7% with respect to Be. However, the TBR with beryllides can be compensated by increasing the multiplier thickness as shown in Fig. 4, as Be12Ti experiences much lower swelling than Be and therefore does not show a temperature limitation like Be (Ref. 17). As a matter of fact, the operation of beryllides could be extended to $\sim 1000^\circ\text{C}$ and virtually

beyond, with the main limitation probably being the oxidation rate at such temperatures. Having Be in the form of a pebble bed as the breeder ceramics was long recognized to be a possible solution for the acute problem of swelling in Be when used in the form of blocks, especially if they are to be brazed to the surrounding cooling structures. 18 However, the very low swelling of beryllides means that a pebble bed may not be required. Also, the greatly enhanced tritium release in beryllides supports the idea of using beryllides in slab or block form [41].

A2.4. Application of beryllium in thermonuclear power engineering

A2.4.1 Experience of obtaining titanium beryllide at JSC "UMP"

The use of Be or Be compounds in the form of prismatic blocks is similar to the fission industry, as such configuration can be found in different test reactors around the world. In particular, the Multi-loop Reactor (MIR) (Russian Federation) uses hexagonal Be prismatic blocks as moderators in which the fuel elements are inserted, which is a similar configuration as the one that can be proposed for the HCPB fuel-breeder pin design. Although there has been no fission reactor using Be₁₂Ti as moderator, some industries have experience producing such material. In particular, Ulba Metallurgical Plant (UMP) (Kazakhstan) has produced Be₁₂Ti ingots under a project with Japan Atomic Energy Agency, Mitsubishi Heavy Industries, and NGK as a previous step for pebble production using the REM. There is therefore an opportunity to set industrial production in the near term [42].

At JSC "UMP" tests were carried out using methods of powder metallurgy, which at the initial stage made it possible to obtain a compact workpiece (x50x50 mm) from titanium beryllide without defects (Fig. A4). The density of the workpiece obtained was 2.237 g/cm³, which is 97.8% of the theoretical value - 2.288 g/cm³.



Figure A4 - A billet from titanium beryllide Be₁₂Ti, obtained by powder metallurgy methods

A product was cut from the obtained workpiece on an electroerosive machine (Fig. A5 a). Cutting was carried out in two stages: first, a through hole was formed in the resulting workpiece in the central part along the axis using a waterjet cutting machine, and then an electric discharge machine was used for further production. This method was used in view of the characteristics of the material: high hardness and brittleness, leading to the chipping off of particles with standard methods of machining.

Thermal cycling tests have been performed on this product. The product was heated, repeated heating and cooling from 300 to 1000 ° C for about 60 seconds in order to determine the stability of the obtained material to alternating dynamic thermal loads (Fig. A5 b), which is due to the modes of operation of this material as an element of a blanket-breeder in the DEMO power plant. [43].

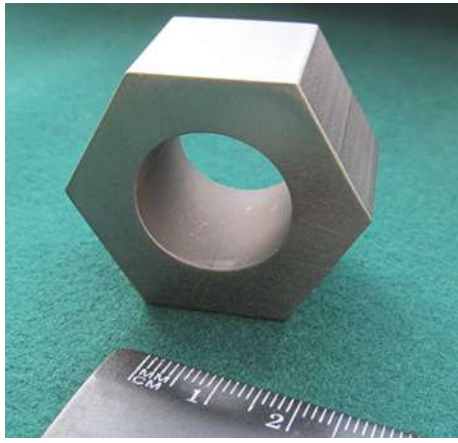


Figure A5 (a) - Product made of titanium beryllide Be₁₂Ti



Figure A5 (b) - Thermocyclation of a product made of titanium beryllide Be₁₂Ti